

Trabajo Fin de Grado

Diseño hidráulico de una instalación para una
batería de flujo redox

Hydraulic design for a redox flow battery facility

Autor:

Álvaro Ibáñez Casao

Directores:

Jorge Barroso Estébanez

Manuel Montiel Argáiz

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2020

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO HIDRÁULICO DE UNA INSTALACIÓN
PARA UNA BATERÍA DE FLUJO REDOX

HYDRAULIC DESIGN FOR A REDOX FLOW
FACILITY

Autor:

Álvaro Ibáñez Casao

Directores:

Jorge Barroso Estébanez

Manuel Montiel Argáiz

ENERO 2020



Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza



Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica
y Tecnologías de la Combustión



Laboratorio de Investigación en
Fluidodinámica y Tecnologías
de la Combustión

*A Félix, Jorge y Manuel,
Por su paciencia, trabajo y la acogida en el LIFTEC.*

*A mi familia,
Sin ellos llegar hasta aquí no hubiera sido posible.*

Resumen

El agravamiento de la crisis medioambiental, climática y de recursos que tiene lugar en la actualidad ha hecho patente la necesidad de un cambio en el modelo de producción de energía global, cambiando las fuentes fósiles por otras renovables. Para compensar la intermitencia de éstas, surgen nuevos sistemas de almacenamiento de energía y, de entre todos ellos, unos de los más atractivos dadas sus ventajas son las baterías de flujo redox.

Este proyecto presenta el diseño de una instalación para una batería de flujo redox de 5 kW de potencia y 10 kW·h de capacidad. Para conseguir estas especificaciones, es necesario bombear dos fluidos desde sendos depósitos hacia la batería. La composición de estos fluidos, el volumen y el caudal son los que condicionan la potencia y la capacidad del sistema electroquímico, por lo que el primer paso de este trabajo es determinar estos parámetros. Con los parámetros de la batería se definen los requisitos que deben cumplir tanto la estación de bombeo (diámetros, materiales que se pueden emplear, etc.) como la estructura metálica donde se dispone la instalación.

También se desarrollan distintos cálculos hidráulicos para seleccionar todos los elementos comerciales que componen la instalación (instrumentación, bombas, depósitos...) y garantizar su correcto funcionamiento en cuanto a caudales y pérdidas de presión. Así mismo, se ha elaborado un presupuesto detallado de los distintos componentes y se ha realizado un análisis de las medidas de seguridad y salud que se deben adoptar tanto para el personal como para la propia instalación.

En el trabajo, además, se detallan los resultados experimentales obtenidos de una batería de menor tamaño, analizando las medidas de pérdida de presión en un electrodo poroso de fieltro de carbono, los ciclos de carga/descarga de la batería y la generación de electrolitos.

El desarrollo de este proyecto ha tenido lugar en el Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión (LIFTEC), donde se pretende construir la instalación diseñada, y posteriormente evaluar la operación de la batería de flujo redox.

Abstract

The aggravation of the current environmental, climatic and resources crisis has made clear the necessity of a change in global energy production model, replacing fossil fuels with other renewable sources. To compensate the intermittence of renewable sources, new energy storage systems have emerged. Among all of them, redox flow batteries are some of the more attractive ones because of their advantages.

This project shows the design of a redox flow battery facility of 5 kW power and 10 kW·h capacity. To achieve these specifications, it is needed to pump two fluids from two reservoirs towards the battery. The fluids composition, their volume and flow rate are the factors that determine the power and capacity of the electrochemical system, thus the first step of this work is to estimate those parameters. From the battery specifications, they are defined the requirements that must meet both the pump station (diameters, materials that can be used, etc.) and the metallic structure where the facility is deployed.

In addition, different hydraulic calculations are done to select the commercial components of the facility (instrumentation, pumps, tanks...) and guarantee their suitable performance in terms of flow rates and pressure losses. Likewise, a detailed budget of the different components has been estimated, and an analysis of the safety-and-health measures that must be adopted for both the staff and the facility has also been made.

The experimental results obtained from a smaller single cell are detailed in the document, where it is analyzed the pressure loss measures in a carbon felt porous electrode, the charge/discharge cycles of the battery and the electrolyte generation.

The development of this project has taken place in the Laboratory of Research in Fluid Dynamics and Combustion Technologies (LIFTEC, Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión), where is pretended to build the designed facility, and later assess the redox flow battery's performance.

Índice

1. Introducción	1
1.1. La situación energética en la actualidad	1
1.2. Sistemas de almacenamiento de energía	2
1.3. Baterías de flujo redox	4
1.4. Baterías de flujo redox todo-vanadio (VRFB)	5
1.5. Estado del arte de las baterías de flujo redox	7
1.6. Objetivos	9
1.7. Estructura	10
2. Diseño de la instalación	11
2.1. Naturaleza de los electrolitos	12
2.2. Cálculos electroquímicos	13
2.3. Cálculos hidráulicos del stack	18
2.3.1. Colectores	19
2.3.2. Rebajes	22
2.3.3. Electrodos	25
2.4. Diseño de la instalación externa	27
2.4.1. Selección de depósitos y cubeto	27
2.4.2. Diseño de la estructura metálica	28
2.4.3. Trazado de la red de tuberías	30
2.4.4. Dimensionado de las tuberías	31
2.4.5. Selección de las bombas	33
2.4.6. Diseño definitivo de la red de tuberías	34
2.4.7. Cálculos hidráulicos de las tuberías	37
2.4.8. Selección de tuberías y auxiliares	45
2.4.9. Instrumentación, selección de sensores	47
2.5. Seguridad y salud	51
2.5.1. Protección de los equipos	52
2.5.2. Equipos de protección individual	52



3. Costes de la instalación	55
3.1. Armazón	55
3.2. Electrolito	56
3.3. Instrumentación	56
3.4. Instalación externa	57
3.5. Resumen de costes	58
 4. Montaje y operación de la batería de flujo redox	 59
4.1. Montaje de la instalación para RFB de 5 kW	59
4.2. Trabajo con una RFB de menor escala	62
4.2.1 Montaje de la instalación para RFB monocelda	63
4.2.2. Generación de los electrolitos	64
4.2.3. Operación de la batería monocelda	66
4.2.4. Medidas de presión de la batería monocelda	67
 5. Conclusiones	 71
5.1. Trabajo futuro	73
 6. Bibliografía	 75
 Lista de figuras	 81
 Lista de tablas	 85
 Anexos	 A1
 Anexo A: Códigos en EES	 A3
A.1. Cálculos para el diseño de la batería	A3
A.2. Cálculo de pérdidas de presión en el stack	A6
A.3. Cálculo de pérdidas de presión en la instalación externa	A16



Anexo B: Cálculos complementarios	A25
B.1. Cálculos químicos complementarios	A25
B.1.1. Determinación del voltaje promedio de celda	A25
B.1.2. Cálculo de la composición del electrolito	A30
B.2. Cálculos relativos al rack	A32
B.2.1. Cálculo de las ruedas para el rack	A32
B.2.2. Simulación informática del rack	A35
B.3. Cálculos hidráulicos	A38
B.3.1. Comprobación de cavitación	A38
 Anexo C. Planos	 A43
C.1.1. Instalación - Vista 1	A44
C.1.2. Instalación - Vista 2	A45
C.1.3. Instalación - Vista 3	A46
C.2.1. Línea 1 - Frontal	A47
C.2.2. Línea 1 - Lateral	A48
C.2.3. Línea 1 - Superior	A49
C.3.1. Línea 2 - Frontal	A50
C.3.2. Línea 2 - Lateral	A51
C.3.3. Línea 2 - Superior	A52
C.4.1. Armazón	A53
C.4.2. Forjado Inferior	A54
C.4.3. Forjado superior	A55
C.5.1. Divisor de Caudal	A56
C.6.1. Marco de Flujo	A57
 Anexo D. Información complementaria sobre seguridad	 A59
D.1. Ácido sulfúrico	A60
D.2. Oxidocloruro de vanadio (V)	A62
D.3. Hidrógeno	A66
 Bibliografía Anexos	 A71

1. Introducción

1.1. La situación energética en la actualidad

La sociedad cada vez es más consciente de la crisis medioambiental que está teniendo lugar y que, en gran medida, ha sido agravada por las actividades humanas de los últimos dos siglos. Para mitigar los efectos del cambio climático y como alternativa a los tradicionales combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural...), se está modificando el mercado de la energía incrementando el peso de diferentes fuentes renovables, entre las cuales destacan las energías solar fotovoltaica y la eólica. Sin ir más lejos, en España la producción eléctrica de estas dos fuentes se ha visto incrementada en más de un 100% en los últimos años (ver Figura 1.1.).

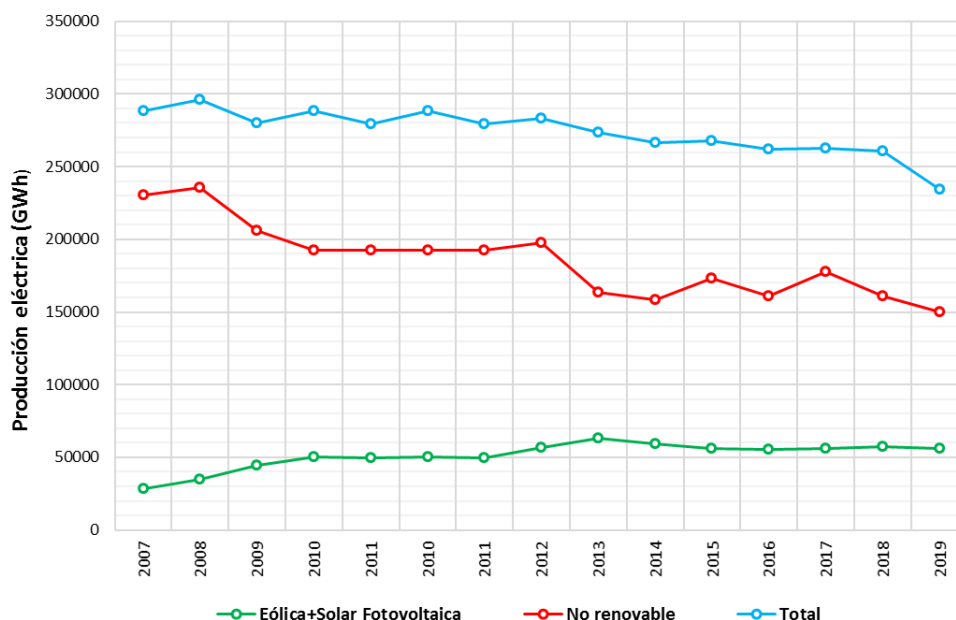


Figura 1.1. Evolución de la producción eléctrica nacional según su origen en el periodo 2007-2019. Fuente: Red Eléctrica de España [1].

A medida que el grado de desarrollo de las fuentes renovables ha aumentado, se ha conseguido reducir algunas de sus desventajas iniciales, por ejemplo, incrementar la eficiencia de producción o disminuir el coste específico de la potencia generada. Sin embargo, uno de los mayores obstáculos que las fuentes de energía renovables siguen teniendo en la actualidad es su intermitencia. Debido a su naturaleza, no son capaces de operar de manera continua, limitando su funcionamiento a periodos concretos de tiempo. Una de las vías para reducir la intermitencia de las energías renovables son los sistemas de almacenamiento de energía, capaces de guardar una parte de la energía



producida durante los periodos de funcionamiento a plena capacidad, para posteriormente poder suministrarla cuando sea requerida en momentos de menor producción.

1.2. Sistemas de almacenamiento de energía

Según su naturaleza, los sistemas de almacenamiento de energía pueden clasificarse en cuatro grandes grupos (ver Figura 1.2):

- *Mecánico*: Los dos sistemas más empleados son el almacenamiento por aire comprimido (CAES) y el bombeo hidráulico (PHS). En el primero, se eleva la presión de aire u otro gas mediante compresores y se almacena en depósitos, para posteriormente expandirse en turbinas y producir trabajo [2,3]. En el segundo, se disponen dos embalses a distinta altura, bombeándose agua al superior para que, cuando sea necesario, ésta descienda por gravedad al embalse inferior accionando unas turbinas hidráulicas a su paso [3,4].

- *Térmico*: Consiste en almacenar calor en un determinado medio material. Se distingue entre sistemas de baja temperatura (LTTES) y de alta temperatura (HTTES) [3]. A su vez, los sistemas térmicos pueden emplear el calor sensible, el calor latente, o el liberado en una reacción química exotérmica [5].

- *Eléctrico*: Los dos sistemas más empleados [3] que almacenan energía eléctrica son los súper condensadores (SCS) y el almacenamiento súper magnético mediante bobinas (SMES). Tienen la ventaja de que su tiempo de respuesta es mucho menor que el de los sistemas térmicos [6].

- *Electroquímico*: Existen dos grupos, las baterías estáticas o convencionales [3] (ion-litio, plomo-ácido...) y las baterías de flujo [7] (hierro-cromo, todo-vanadio...), donde los electrolitos líquidos se hacen circular por un reactor durante el proceso de carga o descarga y se almacenan en depósitos independientes del reactor.

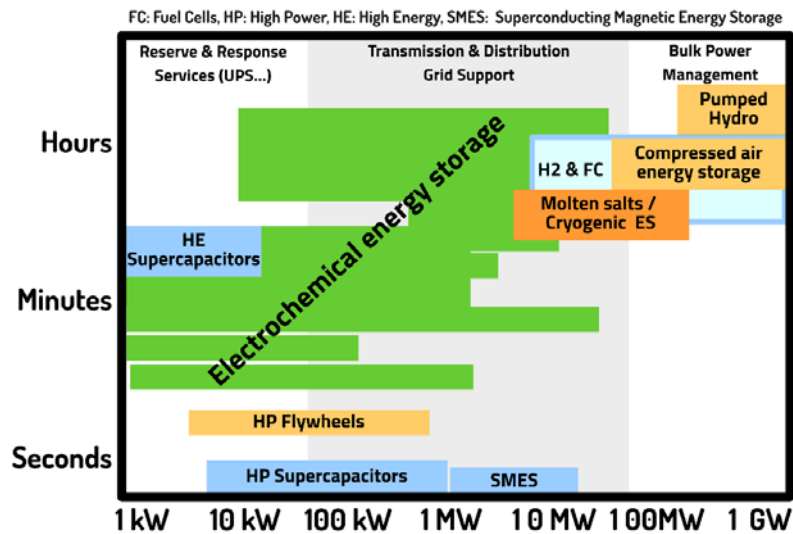


Figura 1.2. Diagrama capacidad-potencia (diagrama de Ragone) en el que se aprecia los rangos de operación de los distintos sistemas de almacenamiento de energía. Fuente: Montiel (Documento interno LIFTEC).

En la tabla 1.1 se recogen los valores de algunos de los parámetros representativos de los sistemas de almacenamiento de energía ya mencionados.

Tabla 1.1. Caracterización de sistemas de almacenamiento de energía según sus parámetros de operación. Fuente: Skyllas-Kazacos [8].

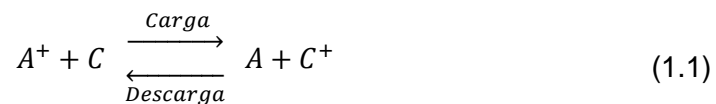
	Rango de potencia	Tiempo de descarga (h)	Tiempo de respuesta	Eficiencia (%)	Coste específico (\$/kW.h)	Vida útil (años)
Aire comprimido	10-1000 MW	0,1 - 15	Muy bueno	60-79	50-110	30
Bombeo hidráulico	10-1000 MW	> 8	Muy bueno	70-85	80-200	30
Almacenamiento térmico	1-100 MW	1 - 45	Lento	60	500	20
Súper condensadores	5-100 kW	0,02 - 1	Bueno	> 95	82000	Baja
Almacenamiento súper magnético	10 MW	0,25	Bueno	90-95	10000	30
Baterías plomo-ácido	1kW-10MW	0,1 - 4	Rápido	70-76	350-1500	5-10
Baterías ion-litio	1kW-100MW	0,1 - 1	Rápido	> 90	850-5000	5-10
Baterías de flujo redox	1kW-100MW	1 - 20	Elevado	75-85	180-250	> 10



Las baterías de flujo redox, a pesar de no estar tan desarrolladas como otros sistemas de almacenamiento de energía, presentan importantes ventajas, como son el hecho de no depender de unas características geográficas muy concretas para su emplazamiento, poseer un coste específico de los más bajos, y un tiempo de descarga mayor que el de otros sistemas. Es por esto que pueden ser dispositivos adecuados para la absorción de picos de producción o para suplir a las fuentes renovables en momentos en los que éstas no pueden ofrecer un suministro adecuado.

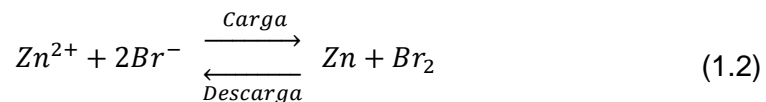
1.3. Baterías de flujo redox

Las baterías de flujo redox (RFB) son un tipo de pilas recargables (secundarias) en las que tiene lugar una reacción de oxidación-reducción reversible entre dos electrolitos en disolución según la siguiente ecuación.



Como cualquier batería, sirven para almacenar energía cuando están cargadas y proporcionar energía eléctrica durante su descarga. La gran diferencia de las RFB respecto a las pilas convencionales es que los electrolitos (positivo y negativo) no se almacenan en el espacio donde tiene lugar la reacción, sino que se guardan en depósitos externos, bombeándose al reactor y retornando a los tanques mediante un circuito cerrado. Esto permite controlar la potencia eléctrica que son capaces de suministrar, con independencia de la energía que son capaces de almacenar.

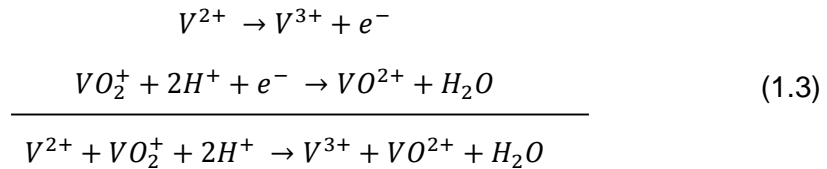
Los electrolitos de las baterías de flujo pueden presentar en su composición sales metálicas o compuestos orgánicos disueltos en agua o en medio no acuoso (orgánico) [7]. En la actualidad los tipos de RFB que gozan de un mayor grado de desarrollo son las baterías de todo-vanadio y las de zinc-bromo que basan su funcionamiento según la reacción:



Aunque se realizaron investigaciones sobre el uso de otros pares redox (hierro-cromo, bromo-polisulfuro...) los inconvenientes que presentaban hicieron que se perdiera el interés en ellos [7].

1.4. Baterías de flujo redox todo-vanadio (VRFB)

Las baterías de flujo redox todo-vanadio operan con 4 estados de oxidación distintos de vanadio en medio ácido: V^{II} / V^{III} (electrolito negativo), y V^{IV} / V^V (electrolito positivo). Las semirreacciones de oxidación y reducción, y la reacción global se muestran en la siguiente ecuación, donde se indican las reacciones de descarga del sistema.



Como puede verse en la figura 3, el electrolito positivo y el negativo se encuentran en dos depósitos independientes y se hacen circular mediante bombas por el interior del reactor o *stack*, compuesto por una o más celdas electroquímicas. En el interior de estas celdas tienen lugar las reacciones de oxidación y reducción sin contacto directo entre los electrolitos, que están separados por una membrana de intercambio iónico.

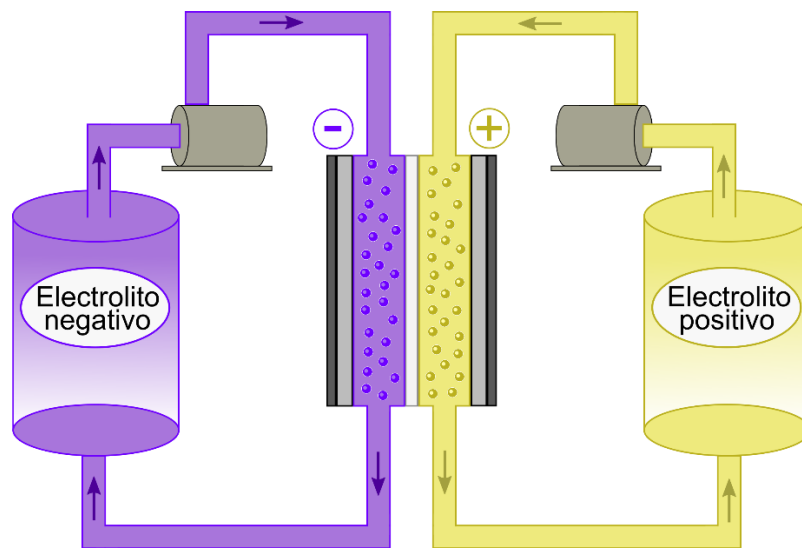


Figura 1.3. Representación de una batería de flujo redox. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 1.4 se muestran los elementos de una celda de una RFB, según Zhang [7].

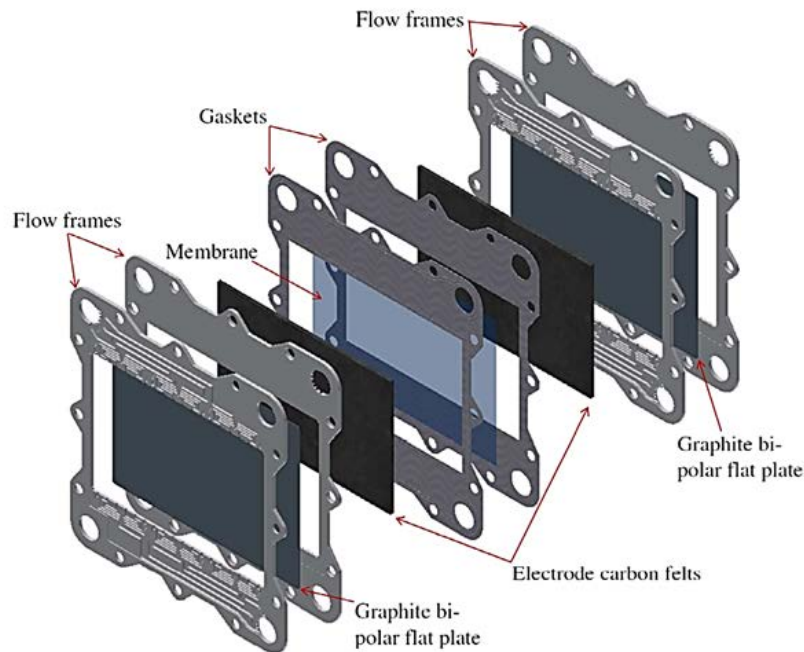


Figura 1.4. Componentes de una celda de batería de flujo redox. Fuente: Guarnieri [9].

Las funciones de los diferentes elementos se detallan a continuación:

- **Membrana:** Evita el contacto directo de los electrolitos dividiendo la celda en dos semiceldas, pero permite el paso de algunos iones para que la carga eléctrica no se descompense y puedan tener lugar las semirreacciones de oxidación y reducción. Generalmente las membranas son de polímeros con grupos iónicos, como Nafion®.

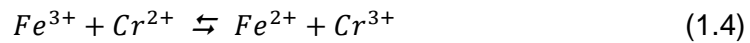
- **Electrodos:** Las semirreacciones tienen lugar sobre su superficie, y su estructura es porosa para facilitar el flujo de electrolito a su paso. Además, deben ser conductores eléctricos, para permitir la conducción de los electrones hacia las placas bipolares. Los materiales más empleados son los fieltros de carbono o grafito.

- **Placas bipolares:** Además de aportar rigidez a la celda con su mayor grosor, conectan eléctricamente las semiceldas, estableciendo una vía por la que circula la corriente eléctrica. Las más comunes están fabricadas de grafito o de materiales compuestos de fibra de carbono y polímeros.

- **Colectores, marcos de flujo:** Su misión es conducir y distribuir los electrolitos por el interior de la celda hasta los electrodos, garantizando un flujo uniforme y con una velocidad adecuada a la cinética de las reacciones que tienen lugar. Hay infinidad de diseños y los materiales más empleados son polímeros resistentes a ácidos, como PVC o fluorados.

1.5. Estado del arte de las baterías de flujo redox

Las baterías de flujo redox se conocen desde el siglo XIX, si bien las primeras aplicaciones prácticas tuvieron lugar en Estados Unidos en la década de 1970, en la NASA, de mano de Lawrence H. Thaller [10,11], empleando como pares redox sales de hierro y cromo.



En la década de 1980 empieza a desarrollarse la tecnología de RFB todo-vanadio en la Universidad de Nueva Gales del Sur (Australia), corrigiendo algunos de los principales problemas de las baterías de flujo redox hierro-cromo [12]. Tras quedar aparcada varias décadas, la investigación y desarrollo en RFB vuelve a avanzar especialmente después de 2010, al hacerse evidente la realidad del cambio climático y la necesidad de cambiar el sistema tradicional de producción de energía a partir de combustibles fósiles [7].

A lo largo de esta década la mayoría de instalaciones de RFB han tenido un carácter experimental y académico, construidas con el propósito de investigar los distintos componentes, y de estudiar su viabilidad como medio de almacenamiento a gran escala. Se podrían citar algunas como la batería de flujo redox todo-vanadio del *Laboratorio de Almacenamiento y Conversión de Energía Electroquímica* de la Universidad de Padua, en Italia (figura 1.5), la VRFB del *Pacific Northwest National Laboratory* de Richland, en Estados Unidos (figura 1.6) o las instalaciones de ensayo de baterías de flujo redox del *Fraunhofer Institute for Chemical Technology* de Pfinztal, Alemania (figura 1.7).

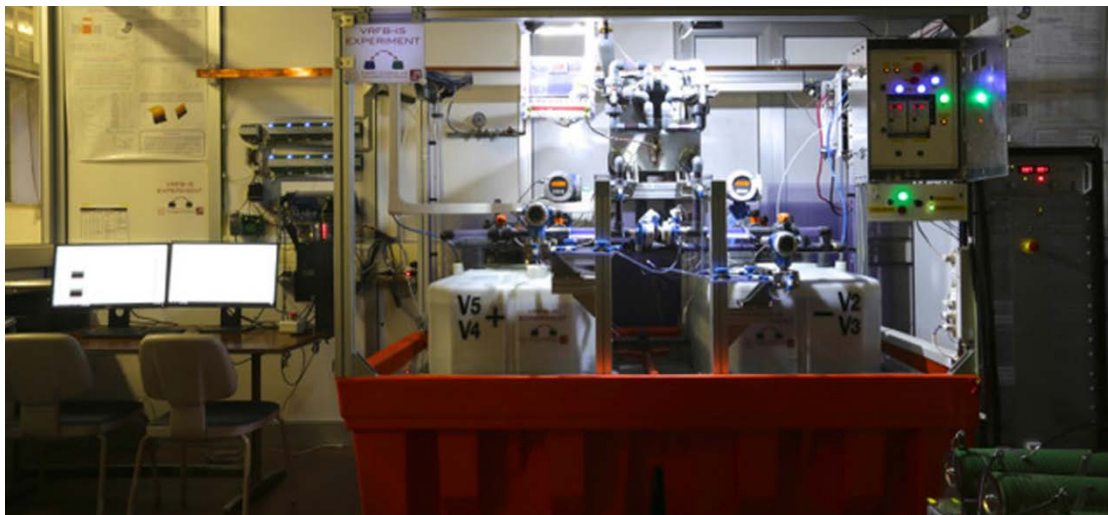


Figura 1.5. Instalación de batería de flujo redox de 9kW/26kWh del Laboratorio de Almacenamiento y Conversión de Energía Electro-química de la Universidad de Padua. Fuente: Guarnieri [9].



Figura 1.6. Instalación de batería de flujo redox de 1kW del Pacific Northwest National Laboratory de Richland. Fuente: Reed [13].

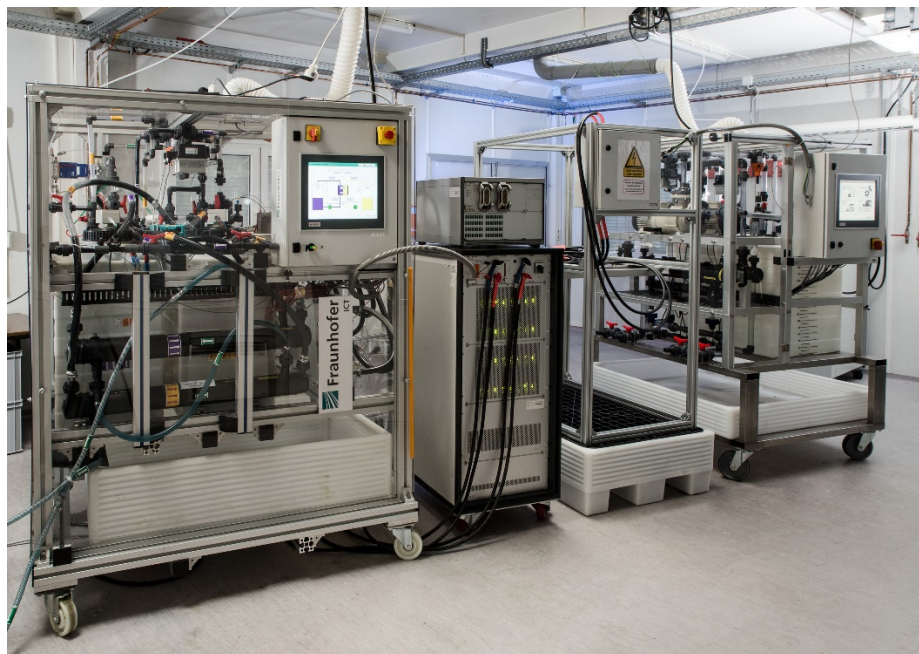


Figura 1.7. Instalación de laboratorio del Fraunhofer ICT en Pfinztal. Fuente: Fraunhofer ICT [14].

Sin embargo, cada vez hay más empresas que desarrollan y comercializan baterías de flujo a distinta escala. En España se pueden citar a *Hydraredox* [15] o *Zigor* [16] entre otras y, a nivel internacional, destacan *VRB Power Systems* [17], *Sumitomo Electric Industries* [18] o *Mitsubishi Chemical Corporation* [19]. Actualmente, países como Estados Unidos o China lideran el desarrollo de esta tecnología. Concretamente, en el país asiático, existen varios proyectos en marcha a una escala del orden de decenas de MW.h en provincias como Hubei (ver figura 1.8) o Dalian (Liaoning), esperando alcanzar en un futuro cercano las centenas de MW.h [20].



Figura 1.8. Operarios en una instalación de VRFB de 3MW/12MWh en Hubei, China. Fuente: Huang [20].

Las baterías de flujo redox todo-vanadio han resultado ser más interesantes que otros tipos de RFB, puesto que el cruce de especies a través de la membrana, aunque existente, es mucho menor, ya que los dos electrolitos están compuestos por el mismo elemento, haciendo su diseño y operación más simple. Durante los procesos de carga y descarga las distintas especies de vanadio solo cambian su estado de oxidación, por lo que los electrolitos no se degradan con el paso del tiempo, teniendo también los electrodos una vida útil prolongada y estable [7].

1.6. Objetivos

Debido a la necesidad de sistemas de almacenamiento de la energía para mitigar la intermitencia de las fuentes de energía renovables y reducir así el uso de combustibles fósiles, se ha propuesto en este trabajo el diseño de una instalación para una batería de flujo redox todo-vanadio de 5kW de potencia y una capacidad de 10kWh, para su posterior construcción y uso.

Los objetivos de este trabajo son los siguientes:



- Cálculo y dimensionamiento del circuito hidráulico de bombeo que suministra los electrolitos al *stack* y los devuelve a sus depósitos.
- Selección de equipos y componentes para la instalación (bombas, tuberías, válvulas, accesorios, sensores...) atendiendo a la demanda de electrolito necesaria para que la reacción química tenga lugar de manera apropiada, todo ello empleando materiales aptos para trabajar en un medio ácido.
- Sistemas de monitorización, control y seguridad de los diferentes parámetros de operación e investigación.
- Diseño del *rack* o armario en el que estará montada la instalación de la batería para su operación.

1.7. Estructura

La memoria de este Trabajo de Fin de Grado se organiza de la siguiente forma:

- El *capítulo 2* se dedica al diseño de la instalación, mostrando los esquemas y diagramas de la misma, así como los requerimientos de los equipos a instalar, justificando las dimensiones y características de los elementos necesarios. También se incluye todo lo relacionado con las medidas de seguridad y de protección del personal y del medio ambiente a implantar.
- En el *capítulo 3* se analizan los costes de la instalación, desde los elementos para elaborar los electrolitos, hasta las bombas, tuberías y accesorios, perfiles metálicos, sensores, etc., desglosando todo en un presupuesto general.
- El *capítulo 4* está dedicado a la construcción de la instalación, comentando su montaje, así como la construcción, operación y experimentos con una instalación de menor escala en las instalaciones del LIFTEC.
- El apartado 5 se dedica a las conclusiones, mientras que el apartado 6 recopila la bibliografía.
- Finalmente se incluyen diversos *anexos* para complementar a esta memoria, mostrando los códigos elaborados para realizar los diversos cálculos, normativas en materia de seguridad y trabajo con sustancias peligrosas, etc.

2. Diseño de la instalación

El objetivo principal de este trabajo es el diseño de una instalación para una batería de flujo redox (RFB) de 5 kW/10 kW.h. Sin embargo, el diseño interno del *stack* de la misma condiciona los parámetros de operación y la propia instalación, pues define las dimensiones, los caudales necesarios o las bombas a instalar, ya que la pérdida de presión que tiene lugar en el *stack* es considerable [21]. En este sentido, los componentes de la batería que más afectarán al diseño de la instalación son:

- *Electrolitos*: Disoluciones de vanadio en un medio ácido, que condicionan la capacidad de la batería y los materiales que deben emplearse en su construcción.

- *Electrodos*: La potencia de la RFB es directamente proporcional al área del electrodo, pues sobre ésta tienen lugar las reacciones químicas de la batería. En los electrodos se produce una importante pérdida de presión, ya que su estructura porosa afecta al flujo de los electrolitos.

- *Marcos de flujo*: Son placas mecanizadas que se encargan tanto de distribuir los electrolitos hacia las distintas celdas del *stack*, como de introducirlos en los electrodos y posteriormente recogerlos. Debido a su geometría (entradas, salidas, cambios de dirección...) una parte de la pérdida de presión de los electrolitos tiene lugar en ellos.

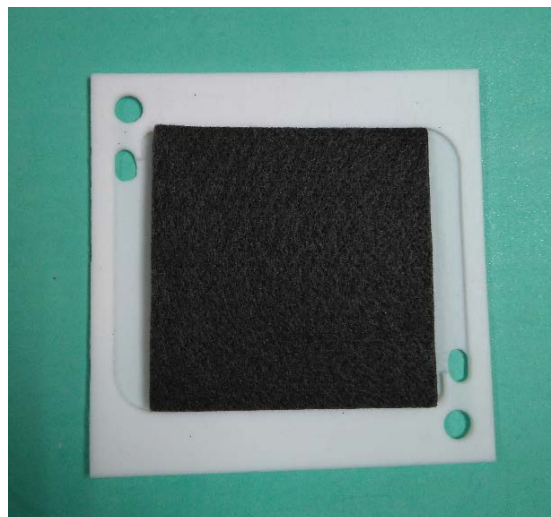


Figura 2.1. Marco de flujo y electrodo de una RFB monocelda empleada en el LIFTEC.

En este capítulo se analizan los electrolitos, su composición y cómo afectan a la elección de los materiales de la instalación. Por otra parte, partiendo de la potencia y capacidad de diseño de la batería se realizan los cálculos electroquímicos para determinar los volúmenes y caudales necesarios de los electrolitos. Por último, se comenta el diseño del *stack*, mostrando sus dimensiones y calculando la pérdida de presión en sus distintos componentes, para concluir con el diseño de la instalación

externa, el dimensionado de tuberías, el diseño de la estructura portante, la selección de equipos (depósitos, bombas, sensores...), etc.

2.1. Naturaleza de los electrolitos

Los electrolitos son una parte fundamental de cualquier batería, ya que facilitan la movilidad iónica en el ánodo y el cátodo. En el caso de las baterías de flujo redox, además, contienen las especies activas (sales de vanadio) y, con la reacción química que se da entre éstas, son capaces de generar corriente eléctrica durante la fase de descarga, o de almacenar la energía durante la fase de carga o reposo. Ambos electrolitos consisten en disoluciones de vanadio en un medio ácido (que facilita la reacción electroquímica), siendo su única diferencia la especie de vanadio empleada en cada uno de ellos: V^{II} (V^{2+}) en el electrolito negativo, y V^V (VO_2^+) en el positivo. Además de vanadio, se empleará ácido sulfúrico (H_2SO_4) y, en menor concentración (aditivo), ácido fosfórico (H_3PO_4). En la tabla 2.1 se recogen algunas de las propiedades de los componentes de los electrolitos.

Tabla 2.1. Propiedades de los componentes de los electrolitos.

	Masa molar (g/mol)	Concentración (mol/L)
V^{II}	50,942	1,6
V^V	50,942	1,6
H_2SO_4	98,079	2,0
H_3PO_4	97,994	0,05

Dada la elevada concentración de H_2SO_4 (el pH de los electrolitos es aproximadamente 0) y de vanadio (V), que es una especie oxidante, todos los componentes de la instalación que estén en contacto directo con los electrolitos (depósitos, tuberías, interior de las bombas...) deben ser capaces de trabajar en un medio ácido y corrosivo. Esto implica que dichos componentes tienen que estar fabricados con unos materiales concretos, generalmente polímeros como teflón (PTFE), policloruro de vinilo (PVC) o polietileno de alta densidad (HDPE), y que el uso de metal queda totalmente descartado para esos elementos.

Por otro lado, el empleo de pequeñas cantidades de ácido fosfórico aumenta la estabilidad química y el rango de temperatura en el cual el V^V es soluble en ácido sulfúrico. Así se evitan posibles precipitaciones de V_2O_5 durante la operación de la RFB, que tienen lugar cuando la temperatura del electrolito empieza a superar los 40 – 45 °C [22]. A pesar de añadir ácido fosfórico y dada la potencia y capacidad de la instalación a diseñar (5 kW/10 kW.h), es probable que la temperatura de los electrolitos supere los 50°C, por lo que sería necesaria la instalación de intercambiadores de calor, aspecto que no se tratará en este trabajo.

2.2. Cálculos electroquímicos

La electroquímica de la batería condiciona la potencia media de operación y la energía que es capaz de almacenar y, por lo tanto, todos los parámetros de diseño que se calculen posteriormente (hidráulicos, térmicos, geométricos, etc.). Las semirreacciones de oxidación y de reducción (ecuación 1.3) tienen unos potenciales de reducción de -0,255 y 1,004 V respectivamente, siendo el potencial estándar de una celda del *stack* (V^0) la diferencia entre ambos, 1,259 V. No obstante, este voltaje es válido para condiciones estándar (presión 1 atm, temperatura 25 °C, concentración 1 mol/L). Para unas condiciones distintas el potencial de celda en condiciones de equilibrio (V_{eq}) se obtiene mediante la ecuación de Nernst:

$$V_{eq} = V^0 - \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left[\frac{C_{V(III)} \cdot C_{V(IV)}}{C_{V(II)} \cdot C_{V(V)} \cdot (C_{H^+})^2} \right] \quad (2.1)$$

Uno de los factores que afecta al potencial de celda es el estado de carga de la batería (SoC), cuyo valor se encuentra entre 0 y 1, y que se define como la siguiente relación de concentraciones, según se trate del electrolito negativo (ecuación 2.2) o del positivo (ecuación 2.3) [23].

$$SoC = \frac{C_{V(II)}}{C_{V(II)} + C_{V(III)}} = 1 - \frac{C_{V(III)}}{C_{V(II)} + C_{V(III)}} \quad (2.2)$$

$$SoC = \frac{C_{V(V)}}{C_{V(IV)} + C_{V(V)}} = 1 - \frac{C_{V(IV)}}{C_{V(IV)} + C_{V(V)}} \quad (2.3)$$

En el caso de las baterías de flujo redox, el SoC de la batería durante las condiciones normales de operación está entre 0,8 y 0,2, si bien se pueden realizar cargas y descargas completas sin problemas.

El potencial de celda puede expresarse en función del estado de carga de acuerdo a la ecuación de Nernst según:

$$V_{eq} = V_H^0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{SoC}{1 - SoC} \right)^2 \quad (2.4)$$

Siendo V_H^0 :

$$V_H^0 = V^0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln(C_{H^+})^2 \quad (2.5)$$

Así, el potencial de celda en equilibrio (potencial a circuito abierto) será aproximadamente 1,33 V para un SoC = 0,5. Sin embargo, el voltaje durante las condiciones de trabajo es inferior al potencial de equilibrio, ya que hay que tener en cuenta diversas pérdidas, como son los sobrepotenciales de activación, la resistencia eléctrica de los materiales que componen la celda, etc. (anexo B). Para simplificar, en este diseño se considera que el potencial de celda medio es de 1,2 V cuando la densidad de corriente es 0,1 A/cm², valor típico de operación empleado en la literatura [8].

La tabla 2.2 recoge los parámetros de diseño necesarios para los cálculos electroquímicos posteriores, mostrando la notación que se emplea a lo largo del trabajo.

Tabla 2.2. Parámetros electroquímicos de diseño, nomenclatura y unidades.

		Unidades
<i>Alfabeto latino</i>		
A_{ef}	Área efectiva del electrodo	cm ²
$C_{V(total)}$	Concentración total de vanadio en el electrolito	mol V / L
E_{stack}	Capacidad, energía almacenada en la batería	kW.h
F	Constante de Faraday	C/mol e ⁻
I_{stack}	Corriente eléctrica del <i>stack</i>	A
J	Densidad de corriente eléctrica	A/cm ²
N	Número de celdas que componen el <i>stack</i>	[-]
SoC	Estado de carga de la batería	[-]
V_{celda}	Voltaje de una celda	V
V_{stack}	Voltaje total del <i>stack</i>	V
$Vol_{electrolito}$	Volumen necesario de cada uno de los electrolitos	L
W_{stack}	Potencia eléctrica de la batería	kW
<i>Símbolos griegos</i>		
α	Factor de flujo	[-]
ρ_{carga}	Densidad de carga eléctrica del electrolito	C/L
$\rho_{energía}$	Densidad de energía de la batería	J/L

En este tipo de dispositivos, la potencia depende de la corriente, que estará condicionada por el área efectiva de electrodo, y del estado de carga de la batería, mientras que la capacidad depende de la concentración y volumen de los electrolitos. Los electrodos de las celdas son cuadrados de 30 cm por lado y están fabricados de fieltro de carbono, teniendo un área activa de 900 cm². La corriente eléctrica del *stack*, 90 A, se obtiene mediante la ecuación:

$$I_{stack} = J \cdot A_{ef} \quad (2.6)$$

A partir de este valor de corriente y de la potencia nominal de la batería se calcula el voltaje medio del *stack* (ecuación 2.7) y, de ahí, el número de celdas necesarias para construir el dispositivo (ecuación 2.8):

$$V_{stack} = \frac{\dot{W}_{stack}}{I_{stack}} \quad (2.7)$$

$$N = \frac{V_{stack}}{V_{celda}} \quad (2.8)$$

El voltaje medio del *stack* (V_{stack}) es de 55,56 V por lo que, considerando un voltaje medio por celda de 1,2 V en condiciones normales de operación, se determina que es necesario agrupar 47 celdas para formar el *stack* de la batería de flujo. El siguiente parámetro a calcular es el volumen de electrolito necesario. Para ello se calcula la densidad de energía de la batería mediante las siguientes ecuaciones,

$$\rho_{carga} = F \cdot (SoC_{max} - SoC_{min}) \cdot C_{V(total)} \quad (2.9)$$

$$\rho_{energía} = V_{celda} \cdot \rho_{carga} \quad (2.10)$$

Conocida la capacidad energética de diseño de la RFB (10 kW.h), el volumen necesario de cada electrolito será de 323,9 litros, de acuerdo a la ecuación:

$$Vol_{electrolito} = \frac{E_{stack}}{\rho_{energía}} \quad (2.11)$$

Uno de los requisitos de la batería de flujo es mantener una potencia constante durante todo el tiempo de operación, para lo que es necesario un flujo constante de especies activas (V^{II} y V^V). El factor de flujo (α) expresa la relación entre el caudal de carga eléctrica en el interior del *stack* (contenida en los electrolitos) y la corriente eléctrica que se produce. Según se haga referencia a la carga o la descarga de la batería, el factor de flujo se expresa según las ecuaciones 2.12 o 2.13 respectivamente, según [21].

$$\alpha = \frac{Q \cdot F \cdot (1 - SoC) \cdot C_{V(total)}}{N \cdot I_{stack}} \quad (2.12)$$

$$\alpha = \frac{Q \cdot F \cdot SoC \cdot C_{V(total)}}{N \cdot I_{stack}} \quad (2.13)$$

En el diseño de una RFB se recomienda mantener un factor de flujo constante (entre 4 y 8) conforme varía el estado de carga [21,24]. El valor de factor de flujo elegido para el diseño actual es de 6. Considerando constante la corriente de *stack* y la concentración total de vanadio, se deduce que el caudal de los electrolitos debe ser variable durante la operación de la batería. Teniendo en cuenta los valores máximo y mínimo del SoC durante el funcionamiento, el caudal evoluciona de la siguiente manera en la carga y descarga (figura 2.2).

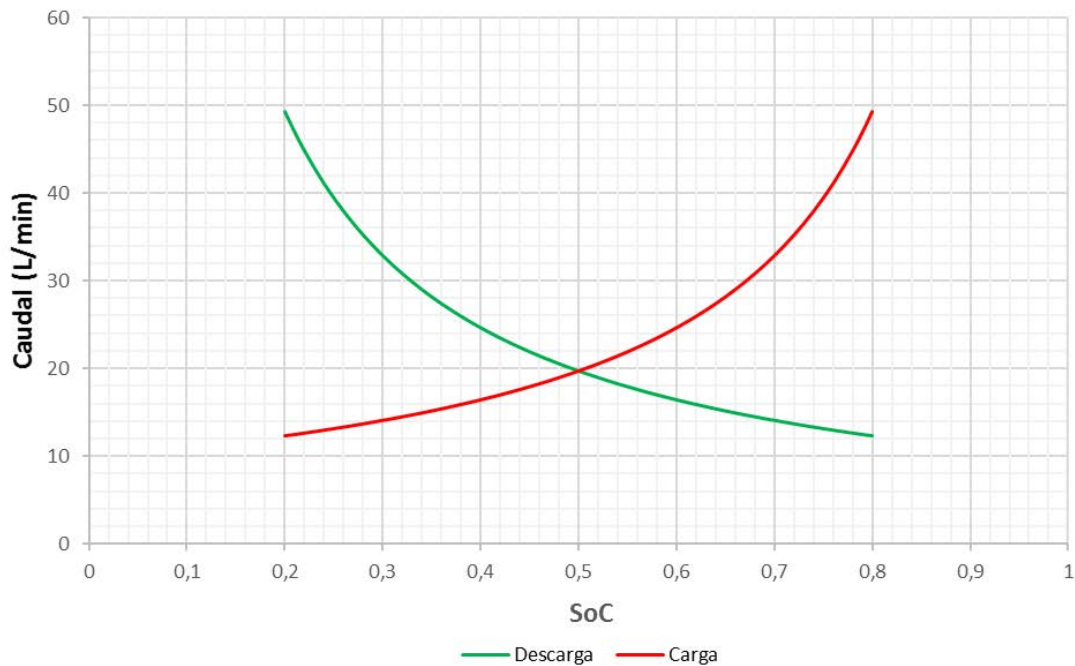


Figura 2.2. Evolución del caudal de los electrolitos en función del estado de carga para asegurar un factor de flujo constante, tanto para carga como descarga de la batería. Fuente: Elaboración propia.

Como puede apreciarse, al inicio de los procesos de carga (SoC=0,2) y de descarga (SoC=0,8) el caudal es bajo, debiendo incrementarse a medida que transcurren. Si se analiza en función de la definición del estado de carga (como ejemplo se toma el electrolito negativo):

- **Carga:** Introduciendo corriente a la batería, los iones V^{III} se reducen y pasan a ser V^{II} . Inicialmente hay una mayoría de V^{III} por lo que, con un caudal bajo, suficientes iones consiguen reducirse al ritmo deseado (α). A medida que la carga transcurre, cada vez queda menos V^{III} , por lo que para mantener la tasa de reducción a V^{II} , deberá circular un caudal mayor.

- **Descarga:** La especie V^{II} se oxida pasando a ser V^{III} y produciendo una corriente eléctrica. Al principio de la descarga hay muchos iones V^{II} , así que con un caudal bajo se oxidarán los suficientes al ritmo necesario. Al disminuir el SoC, cada vez hay menos V^{II} contenido en el electrolito, así que, para que la tasa de oxidación permanezca constante, el caudal tendrá que ser más grande.

En la tabla 2.3 se recogen los valores significativos de la figura 2.2.

Tabla 2.3. Evolución del caudal con la operación, valores significativos.

	Caudal	Unidades
Máximo	49,3	L/min
Mínimo	12,3	L/min
Medio (SoC 0,5)	19,7	L/min

Al realizar un diseño se ha de trabajar con la situación más desfavorable, por lo que de ahora en adelante se empleará como caudal de diseño el caudal máximo.

Por último, se adjuntan en la tabla 2.4 los valores de todos los parámetros que han aparecido a lo largo de esta sección.

Tabla 2.4. Magnitudes de cálculo electro-químicas: Notación, valores y unidades.

	Valor	Unidades
A_{ef}	900	cm ²
$C_{V(total)}$	1,6	mol V / L
E_{stack}	10	kW.h
F	96485	C/mol e ⁻
I_{stack}	90	A
J	0,1	A/cm ²
N	47	[-]
Q_{max}	49,3	L/min
Q_{min}	12,3	L/min
Q_{med}	19,7	L/min
SoC_{max}	0,8	[-]
SoC_{min}	0,2	[-]
V_{celda}	1,2	V
V_{stack}	55,56	V
$Vol_{electrolito}$	323,9	L
\dot{W}_{stack}	5	kW
α	6	[-]
ρ_{carga}	92626	C/L
$\rho_{energía}$	111151	J/L

2.3. Cálculos hidráulicos del stack

Además de los caudales de operación y del tamaño de los depósitos de almacenamiento, las características internas del *stack* condicionan el diseño de la instalación. El tránsito de los electrolitos por las distintas partes del *stack* producirá unas pérdidas de presión importantes, por lo que es necesario realizar los pertinentes cálculos hidráulicos. El cuerpo del *stack* se compone de los siguientes elementos: placas terminales, placas de presión, placas colectoras de corriente, placas bipolares y marcos de flujo (aquí no se consideran elementos como juntas o membranas). En los siguientes apartados, se describirán brevemente estos componentes y se calculará de forma detallada la pérdida de presión del *stack*, cuyas dimensiones externas quedan especificadas en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Dimensiones características de los distintos tipos de placa que constituyen el *stack*.

	Altura (cm)	Anchura (cm)	Espesor (cm)
<i>Placas terminales</i>	50	50	2,0
<i>Placas de presión</i>	40	40	0,3
<i>Placas colectoras de corriente</i>	40	40	0,1
<i>Placas bipolares</i>	40	40	0,5
<i>Marcos de flujo</i>	40	40	0,3

La altura y anchura máxima del *stack* son 50 cm en ambos casos, mientras que la longitud interna y la externa vienen dadas por las siguientes ecuaciones, donde el símbolo t es el espesor,

$$L_{in_stack} = 2 \cdot (t_{p.pres} + t_{p.colect}) + 2 \cdot N \cdot t_{m.flujo} + (N + 1) \cdot t_{p.bip} \quad (2.14)$$

$$L_{ex_stack} = 2 \cdot (t_{p.pres} + t_{p.colect} + t_{p.term}) + 2 \cdot N \cdot t_{m.flujo} + (N + 1) \cdot t_{p.bip} \quad (2.15)$$

A través de estas ecuaciones se determina que la longitud interna y la externa son 53 y 57 cm, respectivamente. Una representación del *stack* se muestra en la figura 2.3.

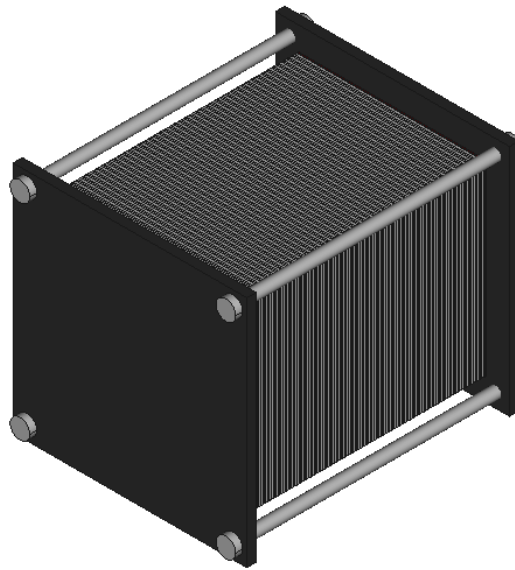


Figura 2.3. Representación simplificada del stack de la batería. Fuente: Elaboración propia.

2.3.1. Colectores

Para cada uno de los electrolitos hay dos colectores: el primero recibe el caudal de electrolito procedente del depósito y lo hace circular longitudinalmente por el *stack* para que se divida y entre en cada celda; el segundo recoge el electrolito saliente de cada celda y lo conduce hasta la salida del *stack*. Estos colectores se encuentran mecanizados en las placas, formando la unión de éstas unos conductos de sección rectangular (representados en amarillo y violeta en la figura 2.4).

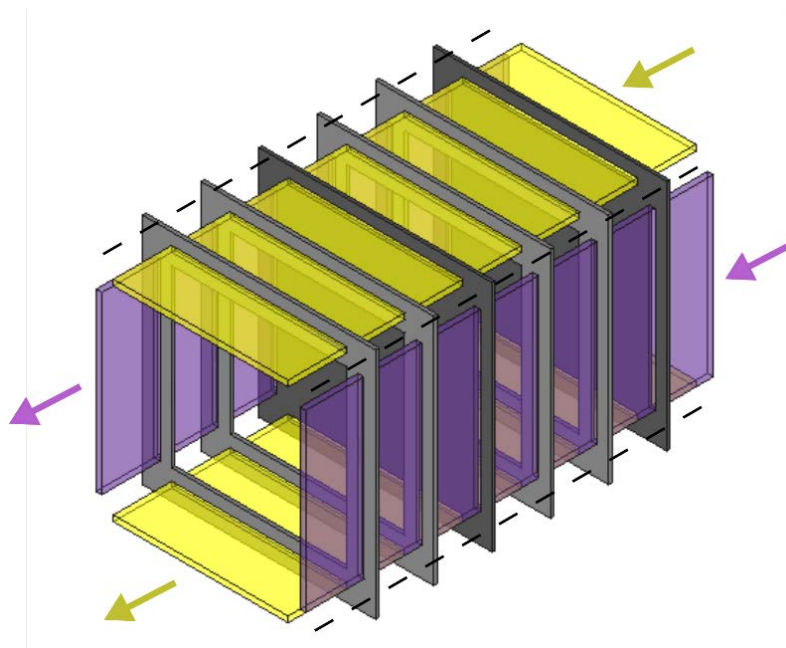


Figura 2.4. Visualización explosionada de los colectores, se representan con un color distinto según circule por ellos un electrolito u otro. Fuente: Elaboración propia.

El sentido de los flujos de electrolito que se ve en la figura 2.4 se denomina configuración en Z. Se ha escogido esta en lugar de la otra configuración posible (en U) porque la pérdida de presión en la primera a lo largo del *stack* se reparte de manera homogénea, garantizando el mismo caudal a cada celda (figura 2.5).

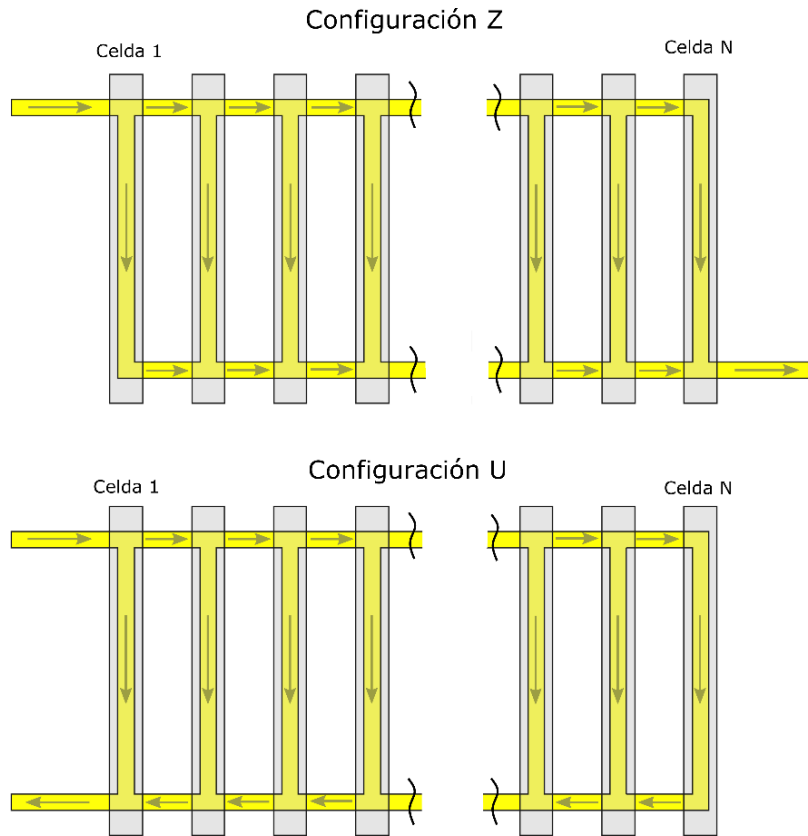


Figura 2.5. Configuraciones del flujo de electrolito a través del *stack*.
Fuente: Elaboración propia.

Se ha considerado que la longitud de los colectores es la longitud interna del *stack*. Las dimensiones de los colectores se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Nomenclatura y dimensiones de los colectores de los electrolitos.

		Valor	Unidades
L_{col}	Longitud de los colectores	53	cm
w_{col}	Anchura de los colectores	30	cm
h_{col}	Altura de los colectores	1	cm
A_{col}	Sección transversal de los colectores	3000	mm ²
Vol_{col}	Volumen de los colectores	1,59	L

Con un buen diseño de los colectores, primero se llenan los canales de entrada por completo y, entonces, los electrolitos entran a todas las celdas por igual. Para que esto se cumpla, los colectores de entrada deberán llenarse lo más rápido posible de electrolito. Se comprueba el diseño calculando el tiempo de llenado (τ):

$$\tau = \frac{Vol_{col}}{Q} \quad (2.16)$$

Siendo éste lo suficientemente pequeño (1,93 s) atendiendo a experiencias previas del grupo de trabajo como para garantizar un llenado rápido y afirmar que el diseño de los colectores es correcto. Al ser éstos conductos de sección no circular, se recurre al uso del diámetro hidráulico (ecuación 2.17) para poder tratar los colectores como tuberías circulares en los cálculos hidráulicos.

$$D_{hid} = \frac{4 \cdot A}{Per} = \frac{2 \cdot A_{col}}{(w_{col} + h_{col})} \quad (2.17)$$

Para calcular la pérdida de presión, lo primero que se debe determinar es el tipo de régimen de flujo que existe en el colector, utilizando el número de Reynolds (ecuación 2.18). Debido a la naturaleza de las reacciones químicas que tienen lugar en las celdas, es necesario garantizar un flujo laminar y uniforme en todo el *stack*.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_{hid}}{\mu} \quad (2.18)$$

Calculándose la velocidad v como

$$v = \frac{Q}{A_{col}} = \frac{Q}{w_{col} \cdot h_{col}} \quad (2.19)$$

La densidad (ρ) y viscosidad dinámica (μ) de los electrolitos se determinará experimentalmente en el momento de su elaboración pero, para el diseño, se asume que son iguales tanto en el electrolito positivo como en el negativo y que tienen los valores especificados en la tabla 2.7 [24–26].

De la ecuación 2.18 se obtiene que $Re = 1457$. Al tratarse de un número de Reynolds menor de 2000 (se acepta como inicio de la transición a la turbulencia $Re \approx 2300$ [27], luego el flujo en los colectores es laminar), se va a usar la correlación experimental desarrollada por Barreras *et al.* [28], específica para calcular el factor de fricción f en celdas electroquímicas de diseño similar a la de este trabajo, en función del régimen de flujo y la geometría del conducto,

$$f = \frac{58,91 + 50,66 \cdot e^{\left(\frac{-3,4}{w_{col}/h_{col}}\right)}}{Re} \quad (2.20)$$

Una vez obtenido el factor de fricción, la pérdida de presión distribuida a lo largo de un conducto se calcula mediante la ecuación de Darcy-Weisbach. Teniendo en cuenta que hay un colector de entrada y otro de salida, la pérdida de presión en colectores para cada uno de los electrolitos viene dada por la ecuación,

$$\Delta P_{col} = f \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \frac{L_{col}}{D_{hid}} \quad (2.21)$$

Los resultados obtenidos de se resumen en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Resumen de las propiedades del electrolito y cálculos hidráulicos de los colectores.

	Valor	Unidades
ρ	1354	kg/m ³
μ	4,928·10 ⁻³	Pa·s
τ	1,93	s
D_{hid}	19,35	mm
v	27,4	cm/s
Re	1457	[-]
f	0,07147	[-]
ΔP_{col}	19,9	Pa

2.3.2. Rebajes

Su misión consiste en introducir el electrolito desde el colector de entrada al electrodo donde tiene lugar la reacción química, y recogerlo para conducirlo al colector de salida. En cada celda hay dos rebajes para cada electrolito que están mecanizados en los marcos de flujo (ver figura 2.6). Un esquema de los dos marcos de flujo de una celda del *stack* con los recorridos de los electrolitos se puede observar en la figura 2.7.

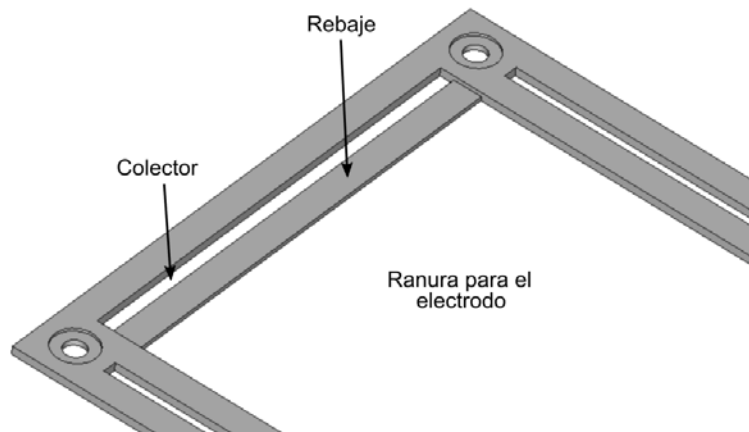


Figura 2.6. Representación gráfica de un marco de flujo, donde se aprecia un colector con su correspondiente rebaje comunicando con la ranura del electrodo. Fuente: Elaboración propia.

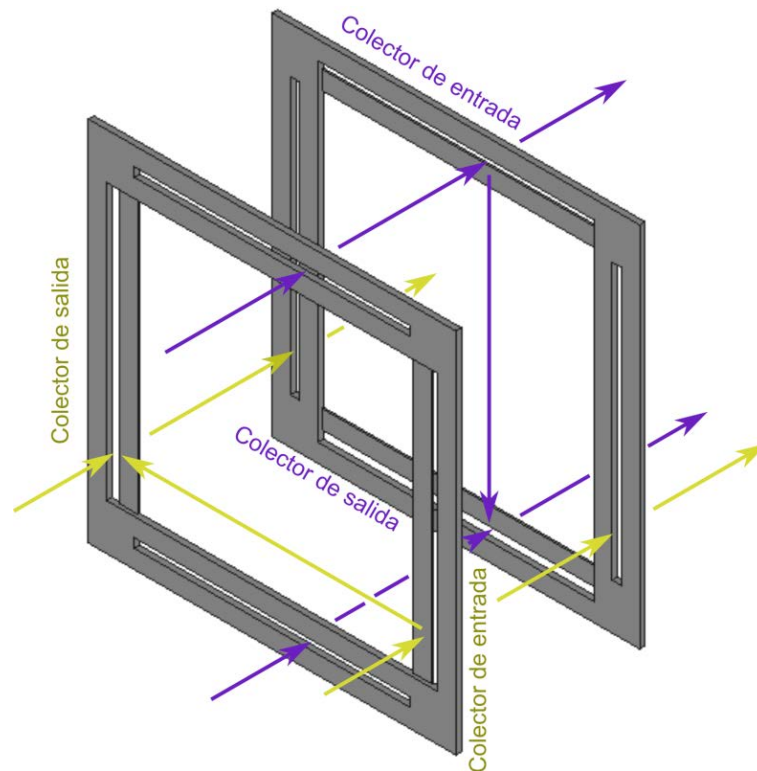


Figura 2.7. Esquema de una celda, donde puede verse el sentido en el que fluyen los dos electrolitos. Cada uno de ellos atraviesa uno de los dos marcos de flujo por las ranuras donde se colocan los electrodos, pero no se mezclan en ningún momento. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 2.8 se adjuntan las dimensiones de los rebajes.

Tabla 2.8. Nomenclatura y dimensiones de los rebajes de los marcos de flujo.

		Valor	Unidades
L_{reb}	Longitud de los rebajes	20	mm
w_{reb}	Anchura de los rebajes	300	mm
t_{reb}	Profundidad de los rebajes	1,25	mm
A_{reb}	Sección transversal de los rebajes	375	mm ²

De nuevo los rebajes son conductos no circulares, por lo que será necesario determinar su diámetro hidráulico según 2.22:

$$D_{hid} = \frac{4 \cdot A}{Per} = \frac{2 \cdot A_{reb}}{(w_{reb} + t_{reb})} \quad (2.22)$$

Según la experiencia previa del grupo de trabajo con pilas de combustible, el factor θ (ecuación 2.23) debe ser menor que 0,4. En este caso $\theta = 0,125$, por lo que se da por válida la geometría de los rebajes.

$$\theta = \frac{A_{reb}}{A_{col}} \quad (2.23)$$

Siguiendo el procedimiento empleado en los cálculos de los colectores, se procede a determinar la velocidad (ecuación 2.19 empleando $A_{reb} = w_{reb} \cdot t_{reb}$ en lugar de A_{col}) y número de Reynolds (ecuación 2.18) del electrolito a su paso por los rebajes, pero hay que tener en cuenta que el caudal no es el mismo que el que pasa por los colectores, sino el que pasa por una celda, 1,05 L/min.

$$Q_{celda} = \frac{Q}{N} \quad (2.24)$$

Una vez determinada la velocidad a partir del caudal de celda, se obtiene que $Re = 31,9$, por lo que el flujo es laminar como se deseaba. La expresión de Barreras *et al.* [28] para calcular el factor de fricción sería válida con una adaptación a los rebajes, como muestra la ecuación,

$$f = \frac{58,91 + 50,66 \cdot e^{\left(\frac{-3,4}{w_{reb}/t_{reb}}\right)}}{Re} \quad (2.25)$$

La pérdida de presión distribuida en los rebajes, teniendo en cuenta que hay dos en cada marco de flujo, se calcula con la ecuación 2.21. Sin embargo, en este caso hay que tener en cuenta las pérdidas singulares, que se calculan mediante la expresión 2.26. Estas pérdidas de presión locales se manifiestan en las entradas y salidas del electrolito a los rebajes (pasar del colector al rebaje, y del rebaje al electrodo),

$$\Delta P_{loc} = K_{el} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (2.26)$$

donde K_{el} es una constante de pérdidas característica de cada elemento singular (codos, válvulas...). Por seguridad, se consideran los valores límite de que $K_{in} = 0,5$ (entrada) y $K_{out} = 1$ (salida), ligeramente superiores a los que corresponderían a una contracción y expansión brusca respectivamente [27,29]. La pérdida de presión del electrolito en los rebajes viene dada por la ecuación,

$$\Delta P_{reb} = 2 \cdot (\Delta P_{dist} + \Delta P_{ent} + \Delta P_{sal}) = \rho \cdot v^2 \cdot \left(f \cdot \frac{L_{reb}}{D_{hid}} + K_{in} + K_{out} \right) \quad (2.27)$$

La tabla 2.9 recoge los resultados calculados en este apartado.

Tabla 2.9. Resumen de los cálculos hidráulicos de los rebajes de los marcos de flujo.

	Valor	Unidades
D_{hid}	2,49	mm
θ	0,125	[-]
Q_{celda}	1,05	L/min
v	4,664	cm/s
Re	31,9	[-]
f	3,412	[-]
ΔP_{dist}	40,37	Pa
ΔP_{ent}	0,736	Pa
ΔP_{sal}	1,473	Pa
ΔP_{reb}	85,15	Pa

2.3.3. Electroodos

Los electrodos son los materiales donde se producen las reacciones electroquímicas. Se colocan en la ranura central mecanizada en los marcos de flujo (figura 2.8). Los electrolitos pasan a través de ellos (cada uno por su respectivo electrodo) y la reacción química de cada celda tiene lugar sobre su superficie.

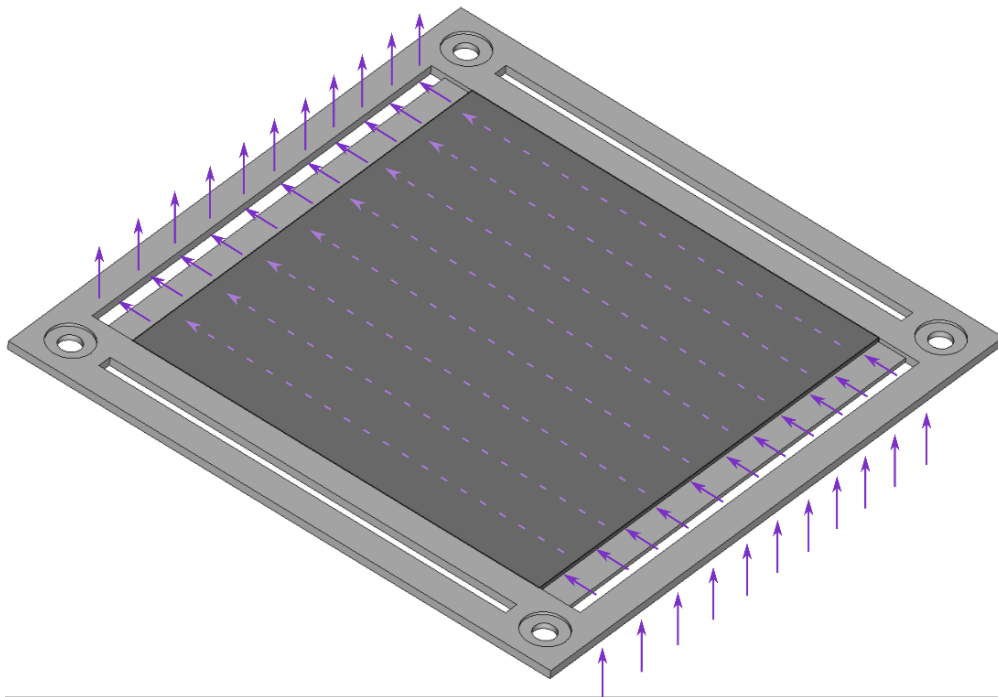


Figura 2.8. Representación de un marco de flujo con el electrodo ya en su interior. Puede verse el recorrido del electrolito a su paso por el marco. Fuente: Elaboración propia.

La estructura del material del electrodo es porosa, fluyendo el electrolito a través de los poros y sufriendo una pérdida de presión a su paso. En la tabla 2.10 se resumen las dimensiones y características porosas de los electrodos.

Tabla 2.10. caracterización de los electrodos, dimensiones, y nomenclatura.

		Valor	Unidades
L_{el}	Longitud de los electrodos	300	mm
w_{el}	Anchura de los electrodos	300	mm
t_{el}	Espesor de los electrodos	3	mm
ϵ	Porosidad de los electrodos	0,9 [24,26,30]	[-]
d_f	Diám. medio de las fibras de los electrodos	17,6 [25]	μm
d_p	Diám. medio de los poros de los electrodos	0,6 [26]	mm
Cte_{ck}	Constante de Kozeny-Carman	4,28 [24–26]	[-]

Al tratarse de flujo en medio poroso, la ecuación de Darcy-Weisbach ya no es válida. Para estimar la pérdida de presión del electrolito a través de un electrodo de este tipo se emplea la expresión 2.28, según [24–26,30].

$$\Delta P_{el} = \frac{\mu \cdot Q_{celda} \cdot L_{el}}{\left(\frac{d_f^2}{16 \cdot Cte_{ck}} \right) \cdot \left(\frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2} \right) \cdot w_{el} \cdot t_{el}} \quad (2.28)$$

Obteniéndose que $\Delta P_{el} = 87125$ Pa, un valor muy superior al de las pérdidas en colectores y rebajes. La pérdida de presión total en el *stack* ΔP_{stack} es:

$$\Delta P_{stack} = \Delta P_{col} + \Delta P_{reb} + \Delta P_{el} \quad (2.29)$$

Siendo ésta 87230 Pa, aproximadamente 8,9 metros de columna de agua. Si se calcula qué porcentaje del total de las pérdidas de presión son debidas al electrodo se obtiene que suponen un 99,88%. Esto era lo esperado, pues varios autores indican que la mayor parte de la pérdida de presión del *stack* sucede en los electrodos [7,21].

Por último, a través de la ecuación 2.30 se comprueba una condición de diseño propuesta por Barbir [31], que representa el hecho de que los colectores deben llenarse por completo antes de que el electrolito comience a fluir hacia los electrodos a través de los rebajes.

$$\frac{\Delta P_{el} + \Delta P_{reb}}{\Delta P_{col}} > 10 \quad (2.30)$$

El diseño del *stack* es óptimo, pues el resultado es 4383, muy superior al valor de 10, recomendado por Barbir.

2.4. Diseño de la instalación externa

A lo largo de este apartado se va a tratar tanto la selección de componentes y equipos como el dimensionado y cálculo de la instalación externa de la batería. Durante el proceso de diseño, la selección de un determinado equipo ha permitido dimensionar o calcular una parte de la instalación y viceversa, es por eso que esta sección se estructura en subapartados ordenados siguiendo el proceso que se ha llevado a cabo.

2.4.1. Selección de depósitos y cubeto

Los electrolitos deben almacenarse en sendos depósitos independientes que alimenten a los electrodos positivo y negativo. Según los cálculos realizados, el volumen necesario de cada electrolito es de 323,9 litros (pág. 4), por lo que se elegirán dos depósitos de 400 L cada uno. Debido a la naturaleza ácida y corrosiva de los electrolitos, los depósitos deberán ser de plásticos que resistan el contacto continuo con el fluido, como polímeros fluorados o clorados, polipropileno o polietileno de alta densidad [32,33]. Se eligen los depósitos de polietileno de alta densidad de *Novodinámica* (figura 2.9) [34].



Figura 2.9. Depósito de plástico de 400 L para almacenar electrolito. Fuente: [34].

El hecho de tener ácido sulfúrico almacenado implica un posible riesgo de vertido, por ello es necesario disponer de algún medio capaz de contener la fuga para su posterior neutralización [33,35]. En este caso ambos depósitos se situarán en el interior de un cubeto de retención que tenga la suficiente capacidad como para almacenar el volumen de electrolito contenido en uno de los depósitos. El cubeto seleccionado proviene de *Cubetosonline* (figura 2.10) [36].

En la tabla 2.12 (página 34) se incluyen las dimensiones de los distintos elementos comerciales seleccionados para la instalación.



Figura 2.10. Cubeto de retención de plástico para los depósitos. Se retirará la rejilla y se introducirán en el interior. Fuente: [36].

2.4.2. Diseño de la estructura metálica

Una vez conocidas las dimensiones y el modo en el que irán colocados los depósitos y el cubeto, se puede empezar a concretar la disposición de los elementos de la batería en la estructura metálica de soporte y sus dimensiones.

La batería se dispondrá en dos alturas: en el nivel inferior se situarán los depósitos y las bombas (al mismo nivel que los depósitos para prevenir problemas de cavitación), mientras que en el superior se ubicará el *stack* y el equipo de procesamiento de datos (armarios eléctricos, monitor, etc.). Los diferentes sensores que sean requeridos se situarán en distintos puntos de las tuberías que transportan a los electrolitos.

La estructura se construirá con perfiles de aluminio de 45x45 mm fabricados por *Bosch Rexroth* [37] como los que se muestran en la figura 2.11.



Figura 2.11. Perfil de aluminio empleado para construir la estructura de la RFB. Fuente: [38].

Por su parte, las uniones entre perfiles se realizarán mediante escuadras metálicas atornilladas como las que aparecen en la figura 2.12, específicas para ensamblar el tipo de perfil a utilizar. Se ha decidido montar la estructura de este modo debido a los buenos resultados obtenidos en anteriores proyectos del grupo de trabajo.



Figura 2.12. Escuadra metálica para unir los perfiles de la estructura. Fuente: [39].

El esquema simplificado de la estructura de la RFB puede verse en la figura 2.13.

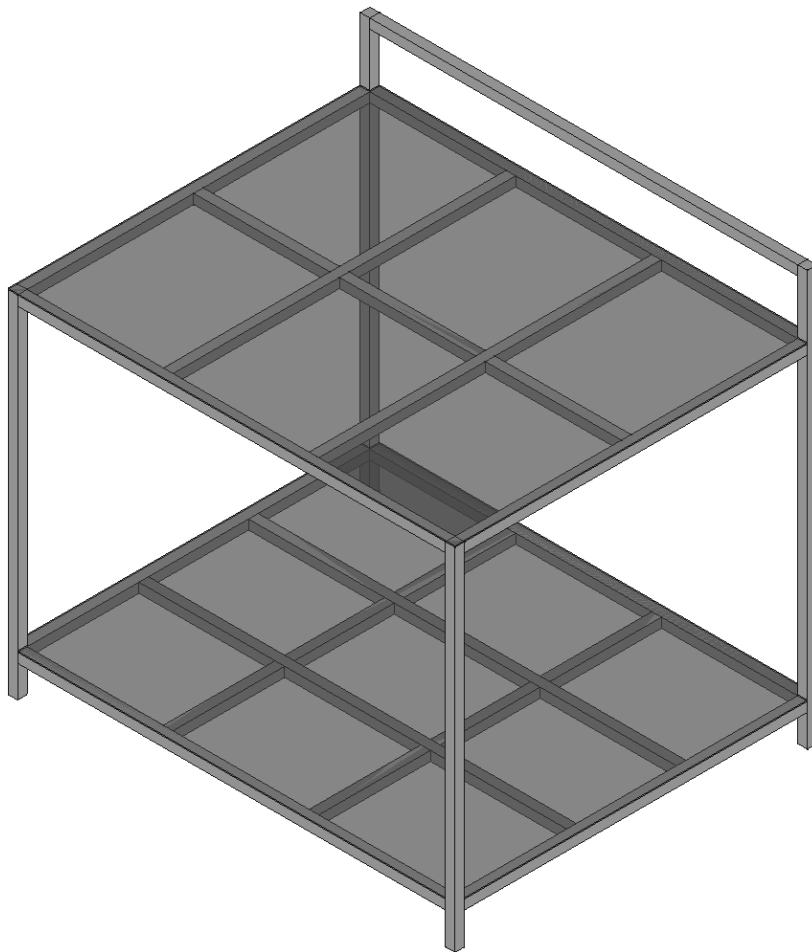


Figura 2.13. Representación gráfica de la estructura metálica donde se dispondrá la batería de flujo redox. Fuente: Elaboración propia.



La estructura dispone de unas ruedas abatibles (cálculo del peso a soportar en el anexo B) para desplazarla en vacío hasta su lugar de operación y, una vez allí, retirarlas, llenar los depósitos de electrolito y comenzar a operar con la RFB, quedando la instalación sostenida por unas patas fijas.

Sobre cada uno de los dos niveles (reforzados en su parte interna con perfiles adicionales para distribuir el peso de la carga que deberá soportar) se colocará un emparrillado metálico, sobre el que se dispondrán los elementos de la instalación. El perfil horizontal situado en la parte trasera del segundo nivel está pensado para atornillar a él los armarios metálicos que contienen los componentes eléctricos/electrónicos, y lograr una mayor seguridad.

Se ha decidido dejar la instalación abierta por motivos de accesibilidad a la misma. En el anexo C se adjuntan los planos detallados de la estructura.

2.4.3. Trazado de la red de tuberías

Para cada uno de los electrolitos se tiene un circuito en lazo cerrado, se bombea desde un depósito al que el fluido acaba retornando. La bomba que se seleccione tiene que ser capaz de cubrir todo el rango de caudales necesarios durante la operación de la batería.

Si la instalación se utiliza en forma modular, puede darse el caso de que se utilice un *stack* con potencia distinta de la original, y que las bombas proporcionen un caudal distinto del deseado. Para prever estos posibles desajustes, cada una de las líneas dispondrá de un *bypass* capaz de derivar parte del electrolito bombeado al depósito, disminuyendo así el caudal que llega al *stack*.

Respecto a las válvulas, se colocará una en la toma de impulsión de la bomba, para poder cortar y regular el flujo. Considerando los posibles ensayos de la RFB, se aislará el *stack* con dos válvulas, una en la entrada y otra en la salida. Por último, se instalará otra válvula en los *bypass* para regular el caudal que se recircula en análisis de RFB de baja potencia. Esta última válvula permanecerá cerrada en el diseño original.

Ambos depósitos estarán comunicados con un tramo de tubería cerrada por una válvula, que se puede utilizar para equilibrar los depósitos, ya que siempre hay un pequeño flujo de iones de una semicelda a la otra a través de la membrana, y con el paso de los ciclos de operación esto se traduce en una descompensación de volumen entre los depósitos. La presencia de aire en el interior de los depósitos es perjudicial, pues el electrolito negativo podría oxidarse ($V^{II} \rightarrow V^{III}$). Para evitarlo se creará una pequeña sobrepresión inyectando nitrógeno en los dos depósitos (se dispone de una línea de N_2), impidiendo así que entre aire. Para evitar el aumento excesivo de presión en los depósitos cerrados durante la operación, cada uno de ellos dispone de una línea de escape de gases, gobernadas por válvulas reguladoras de presión ajustables. Cuando la presión en un depósito alcanza el valor que se ha definido como máximo, la válvula se abre, desalojando gas del depósito a la atmósfera y disminuyendo así la presión en el interior del depósito hasta un valor que garantice la seguridad de la

instalación, cerrándose en ese momento la válvula, y habiéndose solucionado la sobrepresión excesiva sin necesidad de parar la operación de la batería ni tener que intervenir manualmente.

En la figura 2.14 puede verse la representación hidráulica simplificada de la instalación de bombeo de los electrolitos.

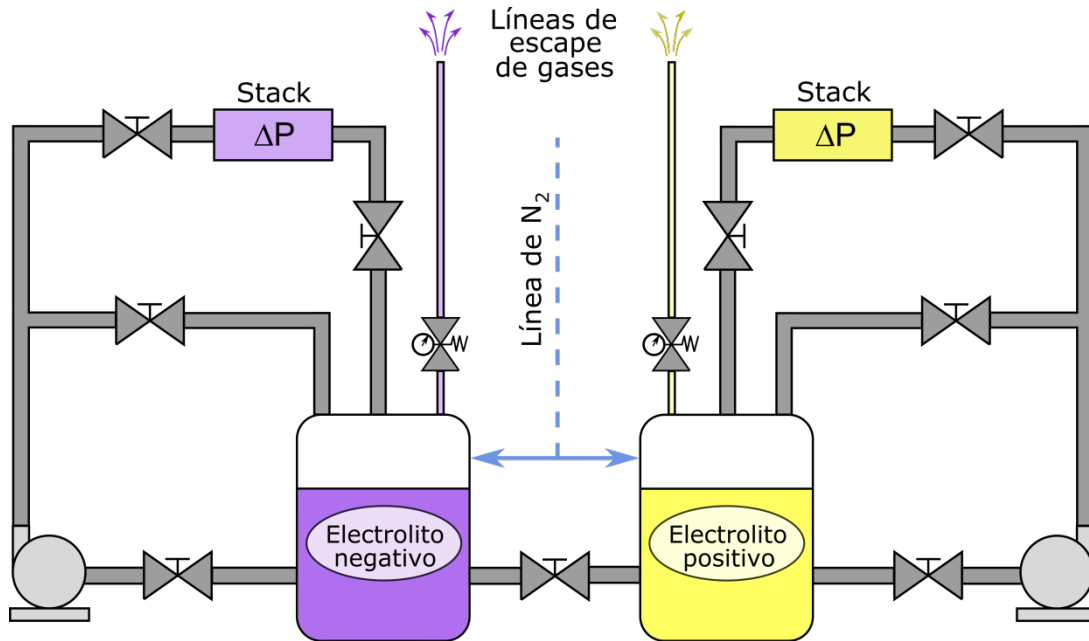


Figura 2.14. Esquema simplificado de la instalación hidráulica de la batería.
Fuente: Elaboración propia.

2.4.4. Dimensionado de las tuberías

El siguiente paso consiste en concretar el diámetro de las tuberías de la instalación. Con este objetivo se confecciona un programa en EES que calcula, en función del diámetro interior, parámetros como el número de Reynolds, la pérdida de carga distribuida por metro de tubería, etc. (anexo A). Analizando los resultados obtenidos para diferentes diámetros de tubería estudiados, se decide utilizar tuberías de diámetro interior 50mm. Para este diámetro, en el caso más desfavorable (caudal máximo, $Q = 49,3$ L/min, ya que a mayor caudal las pérdidas de presión en el electrolito aumentan), la velocidad del electrolito v es 41,87 cm/s y el número de Reynolds 5751, por lo que en las tuberías se tiene flujo turbulento [27].

La velocidad y el número de Reynolds se determinan por las siguientes ecuaciones:

$$v = \frac{Q}{A_{tub}} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (2.31)$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (2.32)$$

En régimen turbulento no existe una expresión teórica para calcular el factor de fricción f , sino que se usan diversas correlaciones experimentales. En este caso se emplea la ecuación de Colebrook-White [40]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} + \frac{\delta}{3,71 D} \right) \quad (2.33)$$

donde δ es la rugosidad del material de la tubería (HDPE, PVC, etc). A partir del valor de f , se calcula la pérdida de presión por metro según la ecuación de Darcy-Weisbach,

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (2.34)$$

Los resultados se muestran en la tabla 2.11.

Tabla 2.11. Caracterización del flujo de electrolito en las tuberías de la instalación. Datos previos y resultados de cálculo.

		Valor	Unidades
Q	Caudal de electrolito	49,3	L/min
D	Diámetro de la tubería	50	mm
A_{tub}	Sección de la tubería	19,63	cm ²
v	Velocidad del electrolito	41,87	cm/s
Re	Número de Reynolds	5751	[-]
δ	Rugosidad de la tubería	1,5 [27]	µm
f	Factor de fricción de Darcy	0,03593	[-]
ΔP_m	Pérdida de carga distribuida por metro	85,27	Pa/m

La pérdida de presión de la instalación externa (ΔP_{ext}) será:

$$\Delta P_{ext} = L_{tub} \cdot \Delta P_m + \sum_{i=1}^n \Delta P_{loc,i} \quad (2.35)$$

A falta de concretar los detalles de la instalación (longitud, codos, reducciones...) y con el fin de poder seleccionar otros elementos de la misma, se considerarán las pérdidas de presión en la instalación originadas en un 70% por el *stack* y un 30% por el resto de componentes de la instalación, basándonos en cálculos preliminares [21].

2.4.5. Selección de las bombas

Dada la ubicación de las bombas (al mismo nivel que los depósitos de electrolito), pueden descartarse problemas de cavitación, por lo que los requisitos de las bombas serán proporcionar una altura y potencia hidráulica suficiente como para superar la pérdida de carga de la instalación, y estar fabricadas con materiales aptos para trabajar con ácido.

Las curvas de bombas centrífugas son parábolas decrecientes, conforme aumenta el caudal disminuye la altura proporcionada. Para un caudal Q , las bombas deberán cumplir que:

$$P_{bomba} \geq \Delta P_{ext} + \Delta P_{stack} \quad (2.36)$$

En este caso, para el caudal de diseño 49,3 L/min ($\sim 3 \text{ m}^3/\text{h}$) la presión de bomba mínima deberá ser 124700 Pa, aproximadamente 12,7 metros de columna de agua (altura). Esta condición se comprueba con las curvas proporcionadas por los fabricantes. Del mismo modo, la potencia hidráulica que la bomba necesita suministrar (ecuación 2.37) se comprueba en las curvas del fabricante.

$$\dot{W}_{hid} = Q \cdot P_{bomba} \quad (2.37)$$

Considerando los valores de caudal y presión mencionados, se obtiene una potencia de 102,5 W, inferior a las potencias proporcionadas por la DB6H, por lo que la bomba cumple con este requisito.

Respecto a los materiales, cualquier parte de las bombas en contacto con los electrolitos (rodete, interiores...) deberá ser de plástico. Tras haber concretados los requisitos se elige la serie DB de *Finish Thompson* [41], pensada para operar en ambientes corrosivos. La bomba seleccionada es el modelo DB6H (figura 2.15) [42]. Aunque varios de los diámetros de rodete disponibles proporcionan la altura necesaria (figura 2.16), se elige el mayor de ellos (106 mm), para disponer de un cierto margen de seguridad.



Figura 2.15. Bomba Finish Thompson DB6H. Fuente: [42].

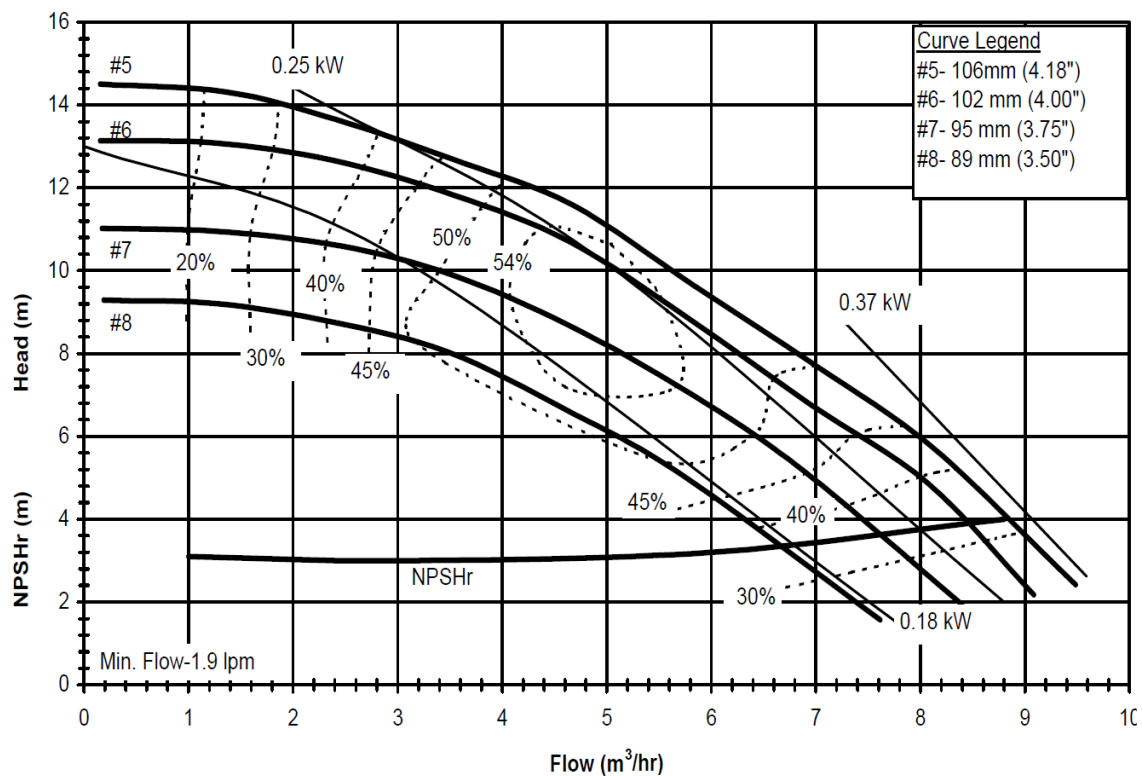


Figura 2.16. Curvas del modelo DB6H. Fuente: Centrifugal-DB Series Curvebook [42].

2.4.6. Diseño definitivo de la red de tuberías

Las dimensiones más significativas de los componentes elegidos se resumen en la tabla 2.12.

Tabla 2.12. Elementos comerciales de la instalación. Dimensiones.

<i>Depósitos de electrolito</i>		
Altura	1130	mm
Anchura	530	mm
Profundidad	1020	mm
<i>Cubeto de retención</i>		
Altura	370	mm
Anchura	1310	mm
Profundidad	1310	mm
<i>Bombas</i>		
Altura	211	mm
Anchura	191	mm
Longitud	456	mm

El diseño de las tuberías se realiza con la máxima de evitar que en una de las líneas de electrolito exista una pérdida de presión mucho mayor que en la del otro, y que esto pueda afectar al funcionamiento de la batería.

Para lograr un flujo más uniforme y mejor distribuido de los electrolitos al introducirlos y sacarlos de los colectores del *stack*, se decide disponer tres puntos de suministro en cada entrada, y otros tres de descarga en cada salida. Para ello se emplearán colectores como los que se muestran en la figura 2.17.

Las tuberías por las que fluyen los electrolitos tienen un diámetro excesivo para el *stack*, por eso se reduce progresivamente su sección transversal de flujo: en primer lugar y antes de llegar a la entrada de los colectores de división de caudal, se pasa mediante reducciones cónicas de $\varnothing 50$ a $\varnothing 25$ mm. Por último, las tuberías de las salidas de los colectores de división de caudal son de $\varnothing 10$ mm, un tamaño mucho más adecuado para introducirlas al *stack*.

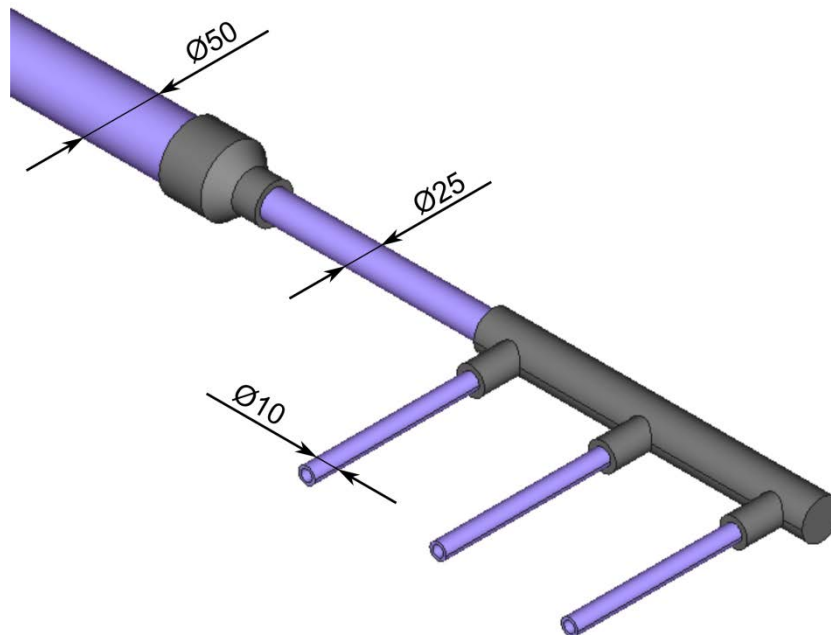


Figura 2.17. Proceso de introducción y recogida de electrolito del *stack*. Puede verse la disminución de sección de las tuberías y la división del flujo. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2.18 se muestra la red de tuberías de la instalación, en color violeta o amarillo según transporten electrolito negativo o positivo, respectivamente. Se han representado elementos externos como los depósitos o el cubeto, mientras que otros como la estructura metálica o los armarios eléctricos no aparecen para garantizar la claridad del esquema y que puedan apreciarse adecuadamente todas las tuberías.

En la parte frontal de los depósitos se encuentra el tramo de tubería que permite comunicarlos si fuera necesario para equilibrar los volúmenes de los mismos. Además, en la misma cara de los depósitos se representa en color azul claro un tramo de las líneas de nitrógeno, como ya se habló en la sección 2.4.3.

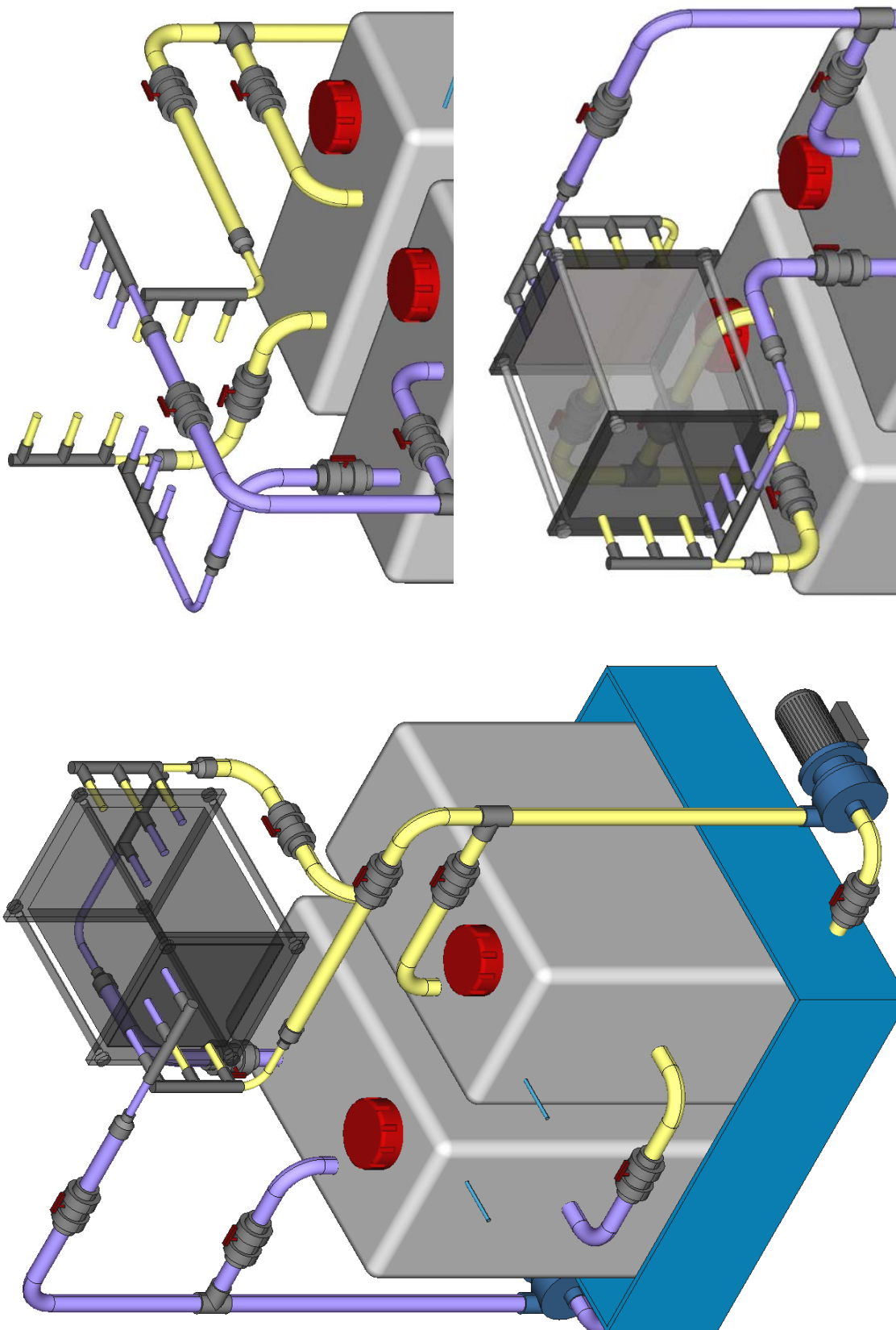


Figura 2.18. Representación y detalles de la instalación de tuberías para los electrolitos, pueden apreciarse las bombas, depósitos, válvulas, etc. Fuente: Elaboración propia.

2.4.7. Cálculos hidráulicos de las tuberías

Para el cálculo de las pérdidas de presión en las líneas de cada electrolito se asumirá el caso de operación normal de la batería, es decir, con las válvulas de *bypass* y la que comunica los depósitos completamente cerradas, por lo que no se tendrán en cuenta dichos tramos de las líneas. En primer lugar, se determinarán las pérdidas en la línea 1 (representada en violeta en la figura 2.18), y posteriormente las de la línea 2 (amarillo). En el caso de las pérdidas distribuidas, se sumarán las longitudes de los tramos rectos de tubería y se redondeará al exceso la longitud total obtenida.

Línea 1:

Para facilitar la comprensión de la línea a calcular (sin *bypass*, etc.), se representa en la figura 2.19.

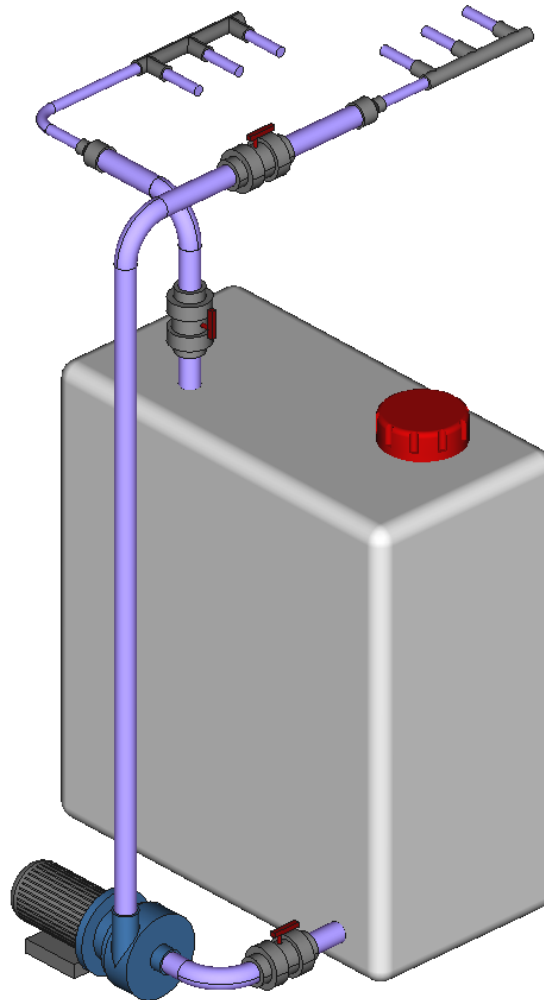


Figura 2.19. Representación de la línea 1 de electrolito. Fuente: Elaboración propia.

Como se ha comentado, en las líneas hay tramos de tubería de diámetros 50, 25 y 10 mm. En cada uno de ellos el flujo es distinto: velocidad, número de Reynolds, etc.

A partir del caudal y las secciones de las tuberías se determinan las velocidades del electrolito (ecuación 2.31), teniendo en cuenta que por los tramos de diámetro 10 mm no fluye el caudal de diseño (Q), sino su tercera parte, aproximadamente 16,43 L/min. Una vez conocidas las velocidades, se obtienen los respectivos números de Reynolds mediante la ecuación 2.32, dándose en todos los casos flujo turbulento ($Re > 2300$), por lo que el factor de fricción f se calculará en todos ellos mediante la expresión de Colebrook-White (ecuación 2.33). Por último, y tomando $L=1$ m en la ecuación 2.34 se determina para la tubería de cada diámetro la pérdida de presión distribuida por metro, ΔP_m .

Para los tres tipos de conducto, los resultados de cálculo obtenidos se muestran en la tabla 2.13.

Tabla 2.13. Resumen de parámetros hidráulicos calculados para las tuberías.

Parámetro	Unidades	$\varnothing 50$ mm	$\varnothing 25$ mm	$\varnothing 10$ mm
Q	L/min	49,3	49,3	16,43
v	cm/s	41,87	167,46	348,88
Re	[-]	5751	11503	9586
f	[-]	0,03593	0,02977	0,03123
ΔP_m	Pa/m	85,27	2261	25735

Denotando con los subíndices 1, 2 y 3 a las tuberías de diámetro 50, 25 y 10 mm respectivamente, la pérdida distribuida total de la línea viene dada por la expresión 2.38. En la tabla 2.14 pueden verse las longitudes al alza de cada tipo de tubería en la línea 1 y la pérdida de presión ΔP_{dist} que conllevan.

$$\Delta P_{dist} = \sum_{i=1}^3 L_i \cdot \Delta P_{m,i} \quad (2.38)$$

Tabla 2.14. Longitudes de tubería y pérdida de presión distribuida en la línea 1.

Parámetro	Unidades	$\varnothing 50$ mm	$\varnothing 25$ mm	$\varnothing 10$ mm
L	m	2,50	1	0,20
ΔP_{dist}	Pa	213,2	2261	5147

Si se suman las tres contribuciones, se tiene que la pérdida de presión distribuida en la línea 1 es de 7621,2 Pa. A continuación, se calcularán las distintas pérdidas locales.



- *Codos*: Como puede verse en la figura 2.19, hay cuatro codos en la línea 1. Tres de ellos unen tuberías de diámetro 50 mm, mientras que otro une tuberías de 25 mm. Las constantes de pérdidas K_i para los codos son 0,57 ($\varnothing 50$ mm) y 0,69 ($\varnothing 25$ mm) respectivamente [29]. A partir de la expresión general de las pérdidas de presión locales (ecuación 2.26) se calculan las pérdidas en los codos como:

$$\Delta P_{\text{codos}} = \frac{\rho}{2} \cdot (3 \cdot K_{50\text{mm}} \cdot v_{50\text{mm}}^2 + K_{25\text{mm}} \cdot v_{25\text{mm}}^2) \quad (2.39)$$

Obteniendo que ΔP_{codos} son 1512,9 Pa.

- *Válvulas*: En este caso hay tres, una en la aspiración de la bomba y las otras en la entrada y salida del *stack*, todas ellas de diámetro 50 mm. Se emplearán válvulas de bola, que permiten tanto cortar el caudal de electrolito como regularlo según su posición. Para este tipo de válvulas y con ese diámetro, la constante de pérdidas considerándolas completamente abiertas (en las condiciones de operación de diseño no se regula caudal mediante las válvulas, por lo que permanecen abiertas) es 0,06 [29]. Las pérdidas en válvulas vendrán dadas por:

$$\Delta P_{\text{valv}} = 3 \cdot K_{\text{valv}} \cdot \frac{\rho \cdot v_{50}^2}{2} \quad (2.40)$$

Estas pérdidas suponen 21,4 Pa, cuando las válvulas están totalmente abiertas.

- *Cambio de sección progresivo*: Se aplica a la reducción cónica de sección a la entrada del *stack*, y al aumento cónico de sección a la salida. Según [29], la pérdida de carga en los aumentos de sección puede calcularse como:

$$\Delta P_{\text{aum}} = K_{\text{aum}} \cdot \frac{\rho \cdot (v_1 - v_2)^2}{2} \quad (2.41)$$

Donde los subíndices 1 y 2 hacen referencia a la entrada y salida del accesorio, y K_{aum} depende del ratio D_2/D_1 y el ángulo de conicidad del accesorio (figura 2.20). Se va a suponer el peor de los casos considerando el mayor ángulo de conicidad para el accesorio (60°), obteniendo así el K_{aum} más alto. Al pasar de 25 a 50 mm, $D_2/D_1 = 2$. El valor de la constante de pérdidas es aproximadamente 0,68.

En el caso de las reducciones progresivas de sección, White [27] indica que las pérdidas son mucho menores que en el caso de un aumento de sección. Puede emplearse la expresión general para pérdidas locales (ecuación 2.26) tomando como velocidad la mayor de las dos, siendo $K_{\text{red}} = 0,07$ cuando la conicidad es de 60° .

Por tanto, las pérdidas por cambios de sección progresivo se determinan como

$$\Delta P_{seccion} = \frac{\rho}{2} \cdot [K_{aum} \cdot (v_{25} - v_{50})^2 + K_{red} \cdot v_{25}^2] \quad (2.42)$$

Como resultado se obtiene 859 Pa.

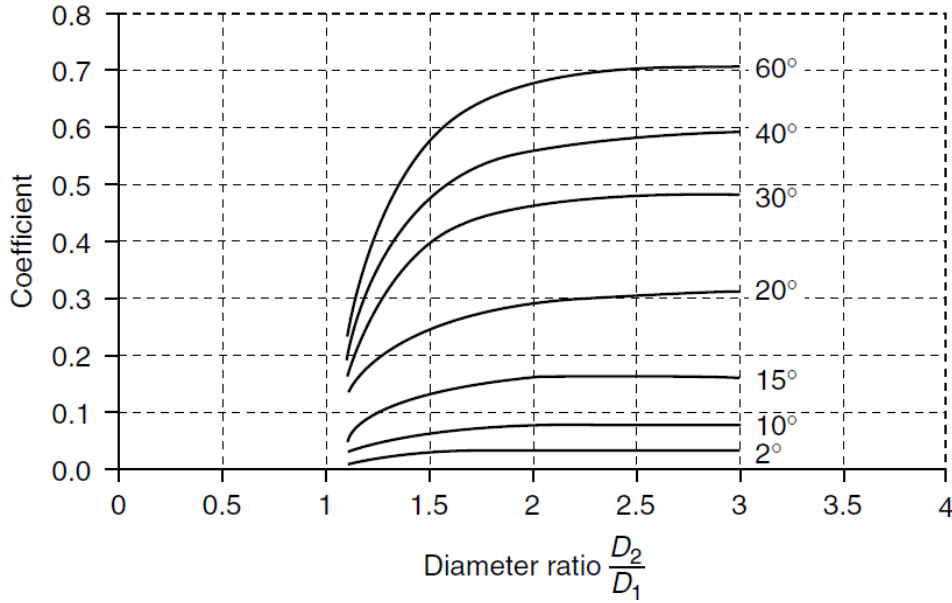


Figura 2.20. Obtención gráfica del coeficiente de pérdidas en función de la geometría del aumento progresivo de sección. Fuente: [29].

- *Entradas y salidas:* En la línea 1 se dan entradas a tubería cuando el electrolito abandona el depósito y cuando sale del *stack* pasando a los conductos de diámetro 10 mm. Por su parte las salidas se dan cuando el electrolito pasa de los tubos de diámetro 10 mm al *stack* y al retornar al depósito. Se toman como constantes de pérdidas $K_{in} = 0,5$ y $K_{out} = 1$ respectivamente [27]. De este modo, las pérdidas locales por entradas y salidas pueden expresarse como:

$$\Delta P_{in-out} = \frac{\rho}{2} \cdot \left[K_{in} \cdot \sum_{i=1}^n v_i^2 + K_{out} \cdot \sum_{j=1}^m v_j^2 \right] \quad (2.43)$$

Siendo n y m igual a 2 (hay dos casos de entrada y dos de salida), y teniendo la pérdida de presión un valor de 12538,4 Pa.

- *Colectores de división de caudal:* No se van a tratar como cambios de orientación del flujo (codos), sino que va a suponerse que el colector se llena y entonces descarga a las tuberías de 10 mm y viceversa, es decir, como un cambio abrupto de sección. En el colector de entrada al *stack* la sección disminuye bruscamente mientras que en el de salida aumenta. Las constantes de pérdidas por contracción y expansión se obtienen gráficamente en la figura 2.21 [27].

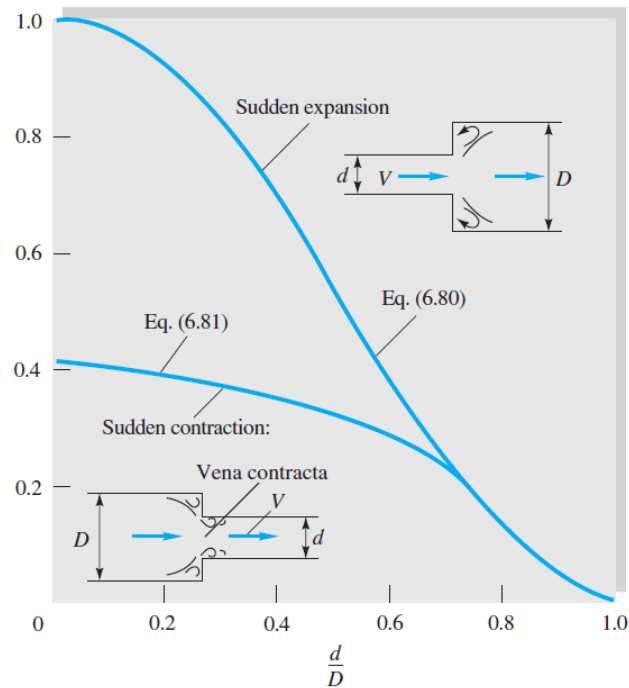


Figura 2.21. Obtención gráfica de los coeficientes de pérdidas de expansión y contracción abrupta, en función de la geometría. Fuente: [27].

La relación d/D es igual a $10/25 = 0,4$. Para ese valor, $K_{con} \approx 0,35$ y $K_{exp} \approx 0,7$. Las pérdidas de presión en colectores de división de caudal vendrán dadas por la ecuación 2.44, obteniéndose 8652,3 Pa.

$$\Delta P_{div} = \frac{\rho \cdot v_{10}^2}{2} \cdot (K_{con} + K_{exp}) \quad (2.44)$$

Para concluir, en la tabla 2.15 se desglosan las pérdidas de presión de la línea 1.

Tabla 2.15. Resumen de las pérdidas de presión de la línea de electrolito 1.

Contribución	Pérdida de presión (Pa)
Distribuidas	7621,2
Codos	1512,9
Válvulas	21,4
Cambios progresivos de sección	859,0
Entradas y salidas	12538,4
Colectores de división de caudal	8652,3
Total	31205,2

Línea 2:

Este caso va a abordarse de manera análoga al de la línea 1, empezando por adjuntar una representación de la línea a calcular (figura 2.22), pasando por los cálculos detallados de las pérdidas de carga distribuidas y locales, para concluir con una tabla que resuma los resultados obtenidos.

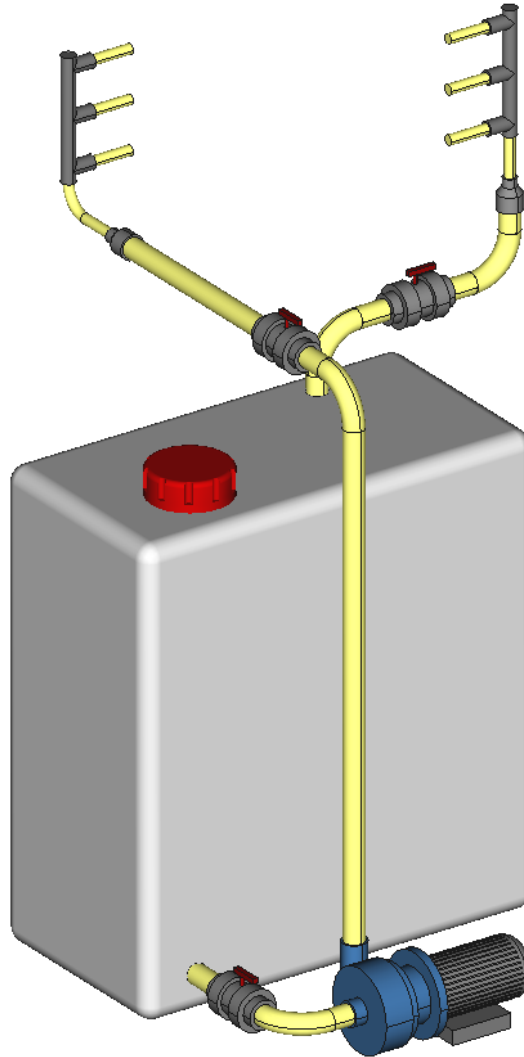


Figura 2.22. Representación de la línea 2 de electrolito. Fuente: Elaboración propia.

Los cálculos de esta línea van a ser más breves, ya que parte de los resultados obtenidos para la línea 1 son los mismos que en esta, empezando por los cálculos hidráulicos de la tabla 2.13.

Para obtener las pérdidas distribuidas de esta línea se usa de nuevo la expresión 2.38. Ya se conocen las pérdidas de presión por metro ΔP_m , por lo que solo resta saber las respectivas longitudes de tubería de cada diámetro. En la tabla 2.16 se muestran los resultados.



Tabla 2.16. Longitudes de tubería y pérdida de presión distribuida en la línea 2.

Parámetro	Unidades	Ø 50 mm	Ø 25 mm	Ø 10 mm
L	m	2,20	0,25	0,20
ΔP_{dist}	Pa	187,6	565,3	5147

La pérdida de presión distribuida en la línea 2 tiene un valor de 5899,9 Pa, algo inferior a la que tiene lugar en la línea 1. A continuación se desglosan las pérdidas locales.

- *Codos:* En este caso se tienen cuatro codos de Ø50 mm y uno de Ø25 mm, por lo que la pérdida de presión se expresa como:

$$\Delta P_{codos} = \frac{\rho}{2} \cdot (4 \cdot K_{50mm} \cdot v_{50mm}^2 + K_{25mm} \cdot v_{25mm}^2) \quad (2.45)$$

De nuevo sigue tomándose 0,57 y 0,69 como constantes de pérdidas para los codos de 50 y 25 mm respectivamente, obteniéndose que $\Delta P_{codos} = 1580,6$ Pa.

- *Válvulas:* Se van a emplear las mismas válvulas en toda la instalación y de nuevo hay tres válvulas en esta línea, por lo que aplicando la expresión 2.40 se determina que las pérdidas de presión en las válvulas son 21,4 Pa.

- *Cambios progresivos de sección:* De nuevo se está en la misma situación, en ambas líneas se usarán el mismo modelo de accesorio cónico, hay uno para aumentar y otro para reducir la sección. Empleando la ecuación 2.42, $\Delta P_{seccion} = 859$ Pa.

- *Entradas y salidas:* En este aspecto ambas líneas de electrolito vuelven a ser análogas, así que empleando la expresión 2.43, se llega a que la pérdida de presión en entradas y salidas de tuberías es 12538,4 Pa.

- *Colectores de división de caudal:* Solo cambia su orientación, pero no su geometría ni los coeficientes de contracción y expansión, por lo que la pérdida de presión es la misma que en los colectores de la línea 1, 8652,3 Pa (ecuación 2.44).

Finalmente, el desglose de pérdidas y el total de las mismas se incluyen en la tabla 2.17.

Tabla 2.17. Resumen de las pérdidas de presión de la línea de electrolito 2.

Contribución	Pérdida de presión (Pa)
Distribuidas	5899,9
Codos	1580,6
Válvulas	21,4
Cambios progresivos de sección	859
Entradas y salidas	12538,4
Colectores de división de caudal	8652,3
Total	29551,6

Si se comparan las pérdidas de ambas líneas (31205,2 y 29551,6 Pa respectivamente) puede verse que la diferencia entre ambas (1653,6 Pa) supone tan solo un 5,3% de las pérdidas de la línea 1. Al tener en cuenta las del *stack* (87230 Pa, apartado 2.3.3), la descompensación en las líneas de electrolito supone un 1,4% tomando a la línea 1 como referencia de nuevo, por lo que el diseño de la red de tuberías se considera óptimo.

Por tanto, las pérdidas de presión de la instalación ΔP_{ins} serán 118435,2 Pa (para el caudal de diseño $Q = 49,3$ L/min), aproximadamente 12,1 metros de columna de agua. Si se comprueban de nuevo las curvas de las bombas (figura 2.16), para ese caudal el modelo elegido proporciona algo más de 13 metros y 0,25 kW, siendo la potencia hidráulica requerida (ecuación 2.37) $97,3$ W \approx 0,1 kW, por lo que la bomba seleccionada es adecuada.

Para concluir, en la figura 2.23 se muestra un diagrama sectorial con el desglose de las pérdidas de presión, para hacer más visuales los resultados obtenidos.

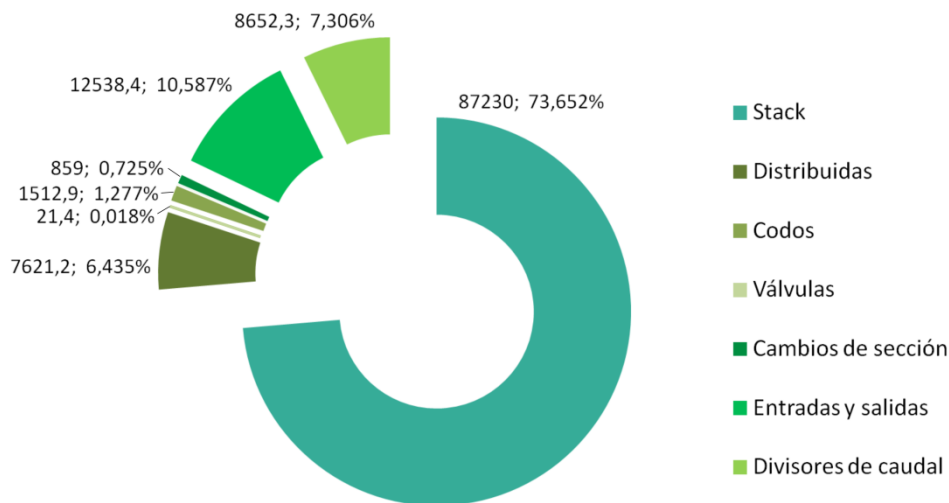


Figura 2.23. Desglose de las pérdidas de presión en la instalación de la RFB, en valor y en porcentaje. Fuente: Elaboración propia.

2.4.8. Selección de tuberías y auxiliares

Una vez concluido el diseño de las líneas de bombeo de los electrolitos, se deben elegir los componentes que la conforman. Tal y como se comentó con los depósitos o los interiores de las bombas, las tuberías y los elementos de las líneas deben ser de plástico para poder operar en un ambiente ácido.

Prácticamente la totalidad de los componentes de las líneas provienen de *Poolaria* [43], pues ofrece una amplia gama de componentes fabricados en PVC, material compatible con los electrolitos. A continuación, se indican los productos seleccionados.

- *Tuberías de diámetro 25 y 50 mm*: Suministradas en barras de 4 m de longitud, resisten una presión nominal de 16 bar (PN-16), más que suficiente para la operación de la batería. Una muestra de las mismas puede verse en la figura 2.24.



Figura 2.24. Tuberías de PVC para las líneas de electrolito. Fuente: [44,45].

- *Tuberías de diámetro 10 mm*: Su función es unir las líneas con las entradas y salidas del *stack*. Dado su pequeño diámetro y para facilitar la conexión con el *stack*, se emplea tubo flexible en lugar de rígido (figura 2.25). En este caso el suministrador es *MW-Materials World* [46].



Figura 2.25. Tubos flexibles de PVC para las líneas de electrolito. Fuente: [46].

- **Válvulas:** La misión de las válvulas de la instalación no es regular caudal, sino detenerlo si fuera necesario. Por ese motivo se van a seleccionar válvulas de bola, pensadas para estar completamente abiertas o completamente cerradas, según el momento de operación de la batería. Las válvulas elegidas son suministradas por *Poolaria* [47], están fabricadas íntegramente en plástico y su presión nominal máxima son 16 bar. En la figura 2.26 puede verse el modelo seleccionado.



Figura 2.26. Válvula de bola $\varnothing 50$ mm, se usará este modelo en todas las líneas. Fuente: [47].

- **Codos:** Hay que tener en cuenta que hay cambios de orientación del electrolito en tramos de tubería de diámetros 50 y 25 mm, por lo que se seleccionan codos de dos tamaños distintos. Están fabricados en PVC, y en la figura 2.27 se muestra uno de ellos.



Figura 2.27. Codo de PVC empleado en las líneas de electrolito. Fuente: [48,49].

- **Tés:** Se necesita una por línea para unir los tramos de *bypass* con su respectiva línea general. No hay ningún cambio de sección en las tuberías en contacto con la té, por lo que todas las tomas del accesorio son de diámetro 50 mm (figura 2.28).



Figura 2.28. Té de PVC empleada para unir las líneas generales con los *bypass*. Fuente: [50].

- *Reducciones cónicas*: En la instalación hay dos por línea, una a la entrada y otra a la salida del *stack*, pasando de un diámetro interno de 50 mm a uno de 25 y viceversa. Como la mayoría de los accesorios, las reducciones también provienen de *Poolaria*. En la figura 2.29 puede verse el modelo elegido.



Figura 2.29. Reducción cónica concéntrica de PVC de diámetros 25-50 mm. Fuente: [51].

- *Divisores de caudal*: Hasta ahora todos los elementos empleados se han encontrado con facilidad. Este caso es distinto, puesto que no es fácil ver comercializado un accesorio tan concreto, tanto por material, número de salidas, diámetros, etc. Por este motivo los colectores divisores de caudal (figura 2.17) se encargan para su fabricación a medida en PVC. El grupo de trabajo tiene experiencias previas con componentes hechos a medida en anteriores proyectos, y tiene la certeza de que es factible fabricar los colectores deseados.

2.4.9. Instrumentación, selección de sensores

Para desarrollar este apartado, en primer lugar se revisó literatura relacionada con instalaciones de RFB ya construidas [9,13,21], donde se pudo comprobar los parámetros de la batería monitorizados, y los sensores concretos que se instalaban.

Los parámetros a medir y controlar durante la operación de la batería son muy variados, desde propiedades físicas de los electrolitos, hasta el estado de carga, pasando por magnitudes relacionadas con los cálculos hidráulicos de la instalación. Se deben monitorizar los mismos parámetros en cada línea de electrolito, por lo que en ambas se instalarán los mismos medidores. En la tabla 2.18 se recogen las magnitudes a medir en la batería, con la designación que se va a utilizar de ahora en adelante.

Además de los sensores y equipos de medición a instalar, para tener control visual durante la operación de la batería los tramos de tubería de diámetro 10 mm (tubo flexible) son transparentes, pudiendo observar en todo momento los electrolitos a la entrada y a la salida del *stack*.

Se instalará en cada depósito un grifo para poder tomar muestras de los electrolitos cuando fuese necesario, pudiendo así realizar diversos análisis *ex situ* (medidas de concentración, detección de impurezas por degradación de componentes, etc.).

Tabla 2.18. Monitorización de la operación de la RFB. Parámetros a medir y designación.

Designación	Magnitud
S1	Estado de carga
S2	Conductividad eléctrica del electrolito
S3	Viscosidad dinámica del electrolito
S4	Caudal de electrolito
S5	Presión a la entrada del <i>stack</i>
S6	Presión a la salida del <i>stack</i>
S7	Temperatura a la entrada del <i>stack</i>
S8	Temperatura a la salida del <i>stack</i>
S9	Corriente del <i>stack</i>
S10	Voltaje del <i>stack</i>
S11	Potencia eléctrica del <i>stack</i>

En la figura 2.30 se muestran los tramos de la instalación donde se colocan los distintos equipos de medición.

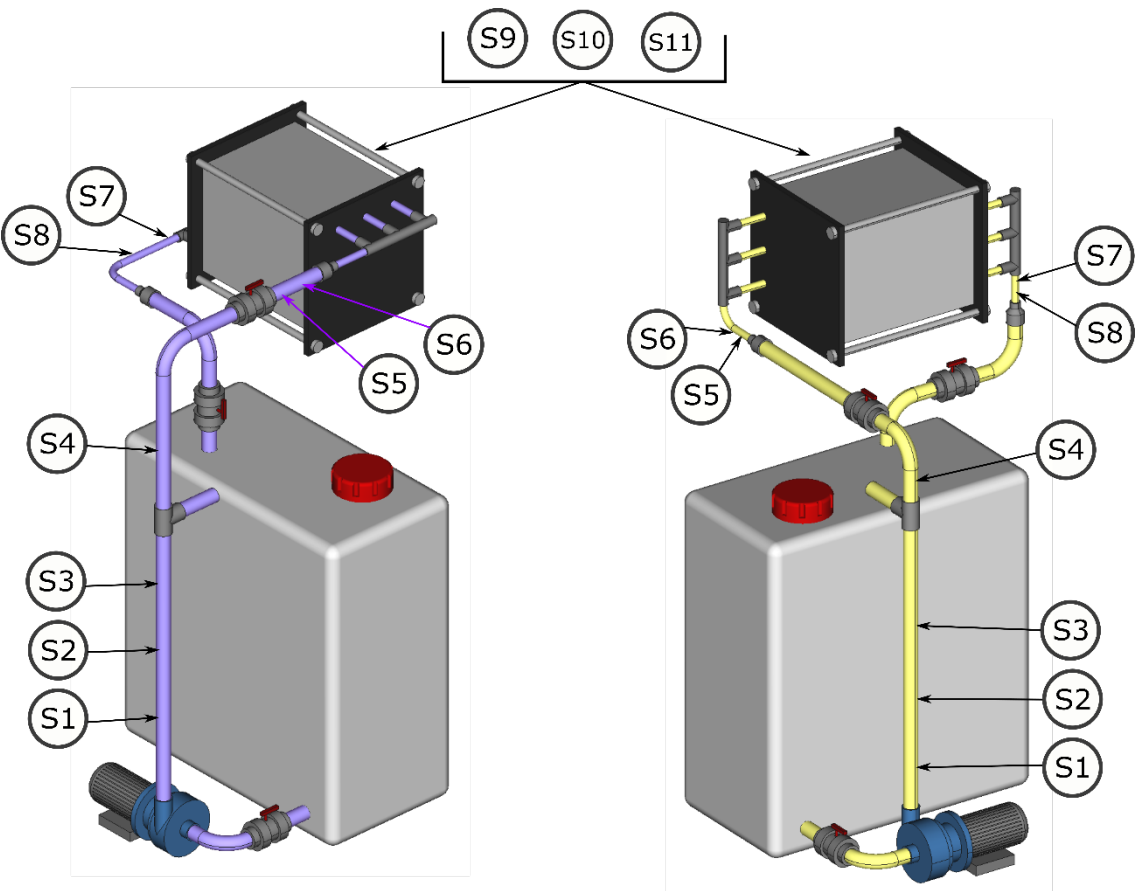


Figura 2.30. Ubicación de la instrumentación en la RFB. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se comentan aspectos relacionados con la monitorización de cada parámetro, indicando los equipos comerciales que se van a emplear, tras haberse comprobado que todos ellos son aptos para la operación en medio ácido y corrosivo.

- *Estado de carga*: La medición del SoC de la batería tendrá lugar empleando sensores ópticos, que miden el índice de refracción de los electrolitos y proporcionan como salida una señal analógica de voltaje proporcional al estado de carga de la RFB. Estos sensores se ubican tras la impulsión de las bombas, y provienen de *JSA Photonics* [52], en la figura 2.31 pueden verse algunos de estos dispositivos.



Figura 2.31. Sensores ópticos de JSA Photonics para medir el estado carga. Fuente: [53].

- *Conductividad eléctrica y viscosidad dinámica del electrolito*: El propósito de medir estos parámetros es determinar el estado de carga de forma complementaria a la previamente comentada, de ahí que su ubicación esté cercana a la de los sensores ópticos que miden el SoC. Existe una relación directa entre el estado de carga y la viscosidad de los electrolitos, pues conforme varía la concentración de iones en éstos, también se ve modificada la viscosidad [23]. Medir la conductividad de los electrolitos proporciona información adicional de otros fenómenos importantes, como la degradación de las especies debido al uso de la batería. Aunque con los sensores ópticos ya se mide el estado de carga de forma directa, también puede determinarse midiendo la conductividad y la viscosidad del electrolito, por lo que serían sensores complementarios a los ópticos.

- *Caudal de electrolito*: Los caudalímetros se ubican tras la derivación del *bypass* (por encima de las térs), para medir así los caudales de electrolito reales que entran al *stack*, independientemente de que se esté recirculando al depósito parte del caudal bombeado mediante el *bypass* o no. La regulación del caudal se efectúa modificando el

régimen de giro de las bombas mediante variadores de frecuencia. Se instalan caudalímetros serie FMG90 de la casa Omega [54] (figura 2.32), cuyas partes húmedas están fabricadas en polifluoruro de vinilideno (PVDF), por lo que puede operar con los electrolitos de la RFB.



Figura 2.32. Caudalímetro con interior de PVDF serie FMG90 de Omega. Fuente: [55].

- *Presión a la entrada y salida del stack:* Es conveniente conocer la pérdida de presión que tiene lugar en el *stack* de la batería, por lo que se coloca un sensor de presión a la entrada y otro a la salida, siendo la diferencia de sus señales de salida la presión diferencial del *stack*. Se deben colocar los sensores lo más próximo posible a la entrada y la salida del *stack* para que la determinación de la pérdida de presión sea precisa, y tenga incluida las menores pérdidas ajenas al *stack*. Los sensores elegidos son los transductores de presión de Mouser Electronics [56] (figura 2.33), que proporcionan una salida de tensión analógica y pueden operar hasta una presión de 100 psi (6,9 bar aproximadamente), por lo que son idóneos ya que en la instalación no se alcanzan esos valores de presión.



Figura 2.33. Transductor de presión 0-100 psi de Mouser Electronics. Fuente: [57].

- *Temperatura a la entrada y salida del stack:* Aunque debido a la fricción con las tuberías la temperatura de los electrolitos aumenta, la mayor parte de este incremento tiene lugar en el interior del *stack*, tanto por parte hidráulica (fricción en colectores, electrodos...) como por la reacción química. Conviene por tanto monitorizar estas temperaturas para controlar que no aumenten tanto como para que los electrolitos se vean afectados [7,22]. Se emplean termopares de TC Direct [58] (figura 2.34),

especialmente pensados para trabajar en ambientes corrosivos, dado su aislamiento con etileno-propileno fluorado (FEP).



Figura 2.34. Termopar aislado con FEP de TC Direct Sensores. Fuente: [59].

- *Corriente y voltaje del stack; potencia de la batería:* Son los parámetros fundamentales de la instalación, es necesario conocer los valores de salida que está proporcionando la instalación en todo momento. La medición de los parámetros eléctricos se efectúa a través de pinzas conectadas a las placas colectoras de corriente del *stack*, mediante un equipo para carga y descarga de baterías (E/PSB 9080-240 3U de *EPS Stromversorgung* [60], mostrado en la figura 2.35, cuya potencia máxima de salida son 10 kW, y sus rangos de corriente y tensión son 0-240 A y 0-80 V respectivamente).



Figura 2.35. Equipo de medición de baterías E/PSB 9080-240 3U de *EPS Stromversorgung*. Fuente: [61].

2.5. Seguridad y salud

A lo largo de este apartado se tratan los aspectos de la instalación que tienen que ver con las medidas de prevención a adoptar para garantizar la seguridad y protección de las personas y equipos durante la operación de la batería. Las principales fuentes consultadas han sido el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST [62]) y el Real Decreto 656/2017 [63] (Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias).

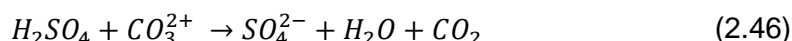


2.5.1. Protección de los equipos

Tal y como se ha ido describiendo, todos los componentes que se encuentren en contacto con los electrolitos están fabricados íntegra o parcialmente (las partes que estén en contacto con el electrolito) con materiales plásticos aptos para la operación en ambientes ácidos y corrosivos: depósitos, tuberías, interiores de las bombas e instrumentación.

El riesgo de fugas de electrolito siempre está presente, por lo que es necesario ubicar los depósitos dentro de un cubeto que pueda contener un posible vertido de ácido. Con el mismo propósito el *stack* se colocará en el interior de una bandeja de plástico.

En el caso de existir un derrame, se debe utilizar arena o sepiolita (un tipo de arcilla) para absorber el vertido, y carbonato de sodio (Na_2CO_3) o de calcio ($CaCO_3$) para neutralizarlo. Lo ideal es neutralizar en primer lugar y después absorber el derrame, pero si se tratase de una fuga importante, el procedimiento a seguir es distinto. La reacción del ácido sulfúrico con el agente neutralizante es la siguiente:



La reacción 2.46 es muy exotérmica y además libera dióxido de carbono, por lo que no es recomendable neutralizar el ácido en lugares cerrados ante vertidos de gran tamaño. En esos casos, se absorbe el derrame y se traslada la arena o sepiolita contaminada a un lugar abierto, donde se procede a su neutralización añadiendo carbonato en pequeñas cantidades.

Una vez el vertido haya sido neutralizado, debe almacenarse en un contenedor de plástico y entregarse a una empresa especializada para que se encargue de su eliminación.

2.5.2. Equipos de protección individual

El uso de los equipos de protección individual (EPIs) correspondientes es obligatorio durante la operación de la batería de flujo redox, dados los riesgos que conlleva una instalación de este tipo. A continuación, se enumeran los distintos equipos que debe llevar cada persona implicada en la manipulación de la instalación durante la operación de la RFB.

- *Mono de trabajo*: Deberá ser lo más ajustado posible al cuerpo, con puños cerrados, y se deberá llevar abrochado completamente en todo momento.

- *Botas de plástico*: Las habituales botas de taller con punta metálica no resistirían un vertido de ácido, por lo que se usarán botas de laboratorio, fabricadas íntegramente con goma.



- *Guantes*: Tanto para la manipulación del *stack*, las bombas o cualquier otro elemento de la instalación el uso de guantes de plástico es obligatorio para evitar el contacto manual directo con los electrolitos.

- *Pantalla facial*: Fabricadas en plástico transparente rígido, cubren la totalidad del rostro para protegerlo ante una posible salpicadura de ácido proveniente de la instalación.

Como puede verse, llevando todos los EPIs aquí mencionados no hay ninguna parte del cuerpo que se encuentre descubierta en caso de que haya contacto directo con los electrolitos, que es el principal riesgo que éstos entrañan. En el anexo D se adjuntan los efectos del ácido sulfúrico y las sales de vanadio en el cuerpo según el tipo de contacto (inhalado, en la piel, en los ojos...) y los procedimientos a seguir en cada caso.

3. Costes de la instalación

Antes de ejecutar cualquier proyecto, debe elaborarse un presupuesto con el análisis de los costes asociados a cada uno de los elementos del mismo. El presupuesto se debe ajustar a los recursos disponibles, para obtener el visto bueno del cliente y poder comenzar con la ejecución.

En este capítulo los costes de la batería de flujo se desglosan en partidas según sea la naturaleza de los elementos a incluir, mostrándose el presupuesto en forma de tabla, donde se incluyen los precios unitarios y las cantidades a emplear.

3.1. Armazón

Los costes asociados a la construcción del armazón se desglosan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Desglose de costes asociados al armazón de la batería.

<i>Elemento</i>	<i>Precio (€/ud)</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Coste (€)</i>
Perfil aluminio RS 45x45 mm (3 m) [38]	59,19	20	1.183,80
Escuadra metálica para perfil RS [39]	6,66	50	333,00
Embellecedor plástico para perfiles (10 ud) [64]	16,75	2	33,50
Emparrillado metálico (3x1 m) [65]	180,00	4	720,00
Armario para conexiónado eléctrico [66]	106,81	2	213,62
Monitor, equipo informático	-	-	1.500,00
TOTAL PARTIDA			3.983,92

Se han incluido los costes de los elementos principales que constituyen el armazón, pero en el caso del monitor y los demás equipos informáticos del sistema de adquisición de datos, se ha estimado un precio dada la gran oferta disponible, eligiéndose los modelos a adquirir en un futuro, cuando se esté ejecutando el montaje de la instalación.

3.2. Electrolito

En la tabla 3.2 se adjuntan los costes de los compuestos necesarios para la elaboración del electrolito.

Tabla 3.2. Desglose de costes de los compuestos empleados en la elaboración del electrolito.

Elemento	Precio (€/ud)	Cantidad	Coste (€)
Ácido sulfúrico 98% (25 L) [67]	226,90	3	680,70
Ácido fosfórico 85% (2,5 L) [68]	86,70	1	86,70
Vanadio sólido (10 kg)	566,00	27	15.282,00
TOTAL PARTIDA			16.049,40

El vanadio sólido que aparece en el presupuesto consiste en sulfato de oxidovanadio (2+) hidratado ($VOSO_4 \cdot x H_2O$, N° CAS: 123334-20-3), una de las especies químicamente compatibles con los electrolitos y que es suministrada por *Sigma-Aldrich* [69]. Para generar las especies de V^{II} o V^V en cada uno de los depósitos, habría que realizar procesos de electrólisis que encarecerían aún más el precio total del electrolito, por lo que se estudian otras dos alternativas:

- Adquirir óxido de vanadio (V) (V_2O_5 , N° CAS: 1314-62-1), el principal producto del tostado de las menas de vanadio, por lo que resulta más económico, y que también es suministrado por *Sigma-Aldrich* [70]. El precio por kilogramo de vanadio se reduce notablemente usando esta especie. Sin embargo, sería necesario realizar varias electrólisis por etapas hasta obtener las especies de vanadio para los electrolitos, por lo que no se conoce el coste real de esta opción.

- Adquirir el electrolito ya fabricado con la siguiente composición: 2 mol/L H_2SO_4 , 0,05 mol/L H_3PO_4 , 0,8 mol/L V^{III} , 0,8 mol/L V^{IV} . Resultaría más caro, pero no habría que comprar ninguna especie más, y en la misma RFB podría llevarse a cabo la electrólisis para convertir todo el vanadio del electrolito en V^{II} o V^V , según se tratase del electrolito negativo o positivo respectivamente. Si se decidiese esta opción, habría que buscar una empresa que se encargase de producir el electrolito deseado.

En el presupuesto por tanto aparece la opción menos económica de las que se conoce el precio, decidiéndose una alternativa u otra en el futuro.

3.3. Instrumentación

Los costes de los distintos equipos de instrumentación se adjuntan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Desglose de costes asociados a la instrumentación de la batería de flujo.

<i>Elemento</i>	<i>Precio (€/ud)</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Coste (€)</i>
Sensor óptico para estado de carga [53]	53,48	2	106,96
Caudalímetro [55]	735,00	2	1.470,00
Termopar aislado [59]	43,90	4	175,60
Transductor de presión [57]	63,95	4	255,80
Equipo de medición de baterías [61]	13.565,00	1	13.565,00
TOTAL PARTIDA			15.573,36

En la mayoría de las páginas de los suministradores aparece el precio de los equipos de medida. En aquellos casos en que el precio no estaba disponible en la página web de la empresa, se solicitó un presupuesto, siendo el coste que aparece en la tabla el que indicaron.

3.4. Instalación externa

En la tabla 3.4 se desglosan los costes de los distintos elementos que conforman la instalación externa de la batería de flujo.

Tabla 3.4. Desglose de costes asociados a la instalación externa de la batería de flujo.

<i>Elemento</i>	<i>Precio (€/ud)</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Coste (€)</i>
Tubería PVC Ø50 mm (4m) [45]	9,76	3	29,28
Tubería PVC Ø25 mm (4m) [44]	2,57	1	2,57
Tubo flexible Ø10mm (1m) [46]	1,29	3	3,87
Codo PVC Ø50 mm [49]	1,29	11	14,19
Codo PVC Ø25 mm [48]	0,41	2	0,82
Té PVC Ø50 mm [50]	1,77	2	3,54
Reducción cónica PVC Ø50-25 mm [51]	1,45	4	5,80
Válvula de bola [47]	13,79	9	124,11
Colector divisor de caudal	100,00	4	400,00
Depósito plástico 400 L [34]	435,95	2	871,90
Cubeto de retención [36]	399,00	1	399,00
Bomba Finish Thompson DB6H [42]	815,44	2	1.630,88
TOTAL PARTIDA			3.485,96



Los colectores divisores de caudal se fabricarán por encargo y se desconoce su importe. Se estiman 100€ por colector.

A las partidas mostradas en este capítulo habría que agregarle el coste del *stack* (placas, mecanizados, electrodos, membranas, etc.) pero queda fuera del alcance de este trabajo, y, además, estos costes se conocerán a medida que vayan adquiriéndose los distintos materiales que se necesitan.

3.5. Resumen de costes

A continuación, se adjuntan en la tabla 3.5 los costes resumidos de las distintas partidas.

Tabla 3.5. Resumen de los costes de las partidas que componen el presupuesto del proyecto.

<i>Partida</i>	<i>Coste (€)</i>
Armazón	3.983,92
Electrolito	16.049,40
Instrumentación	15.573,36
Instalación externa	3.485,96
TOTAL	39.092,64

De este modo, el coste total del armazón, fluidos, sistema de suministro y equipos de la instalación para la batería de flujo redox (sin incluir el *stack*) es de treinta y nueve mil noventa y dos con sesenta y cuatro euros (39.092,64 €).

4. Montaje y operación de la batería de flujo redox

En la primera parte de este capítulo se explica el procedimiento de construcción y montaje de la instalación para la RFB de 5 kW diseñada y analizada en los capítulos anteriores, que tendrá lugar en los próximos meses en las instalaciones del LIFTEC. En una segunda parte se explica el procedimiento de montaje, diversos ensayos y la operación de una batería de flujo prototipo de menor escala adquirida por el LIFTEC, con el fin de disponer de experiencia y resultados previos sobre los que apoyarse antes de abordar la ejecución de la instalación de RFB de 5 kW.

4.1. Montaje de la instalación para RFB de 5 kW

Para explicar el procedimiento de montaje de la estructura, se va a seguir un estilo descriptivo, es decir, unas breves indicaciones secuenciales ordenadas a modo de instrucciones, acompañadas de imágenes para aclarar los pasos a seguir.

El procedimiento de montaje de la estructura es el siguiente:

1 - Tras cortar los perfiles de aluminio a las medidas necesarias, ensamblarlos mediante las escuadras y tornillos para construir el armazón metálico, con las ruedas abatibles, de tal forma que las patas fijas no toquen el suelo.

2 - Colocar las rejillas metálicas (con los huecos por los que pasarán las tuberías ya mecanizadas) en los forjados superior e inferior para poder cargar la estructura.

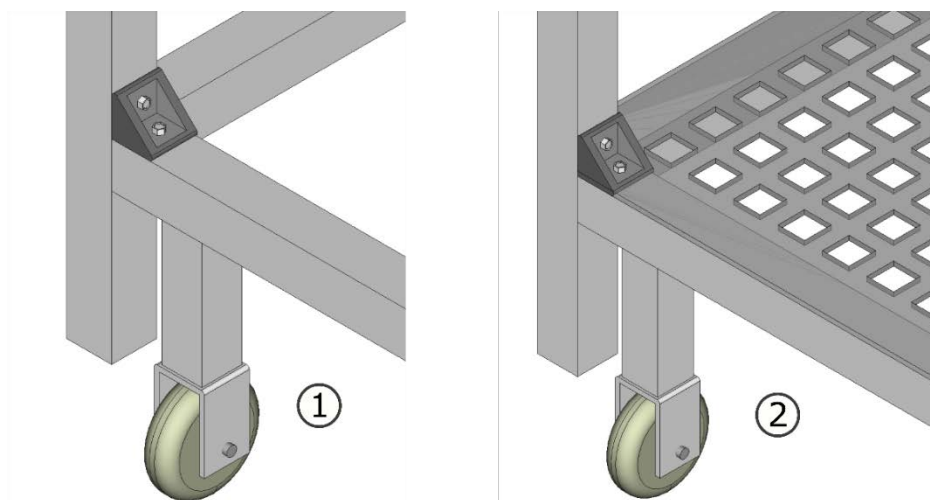


Figura 4.1. Montaje del armazón de la instalación. Fuente: Elaboración propia.

3 - Realizar las tomas de entrada y salida correspondientes tanto a depósitos como a cubeto.

4 - Colocar los depósitos en el interior del cubeto, instalar los tramos de línea que llevan a las bombas (sellando las tomas del cubeto para evitar fugas), la línea que comunica a ambos depósitos y las respectivas salidas de toma de muestras.

5 - Colocar el montaje del paso 4 en el forjado inferior del armazón, instalar las tomas de aspiración de las bombas a la instalación, y asegurar las bombas al armazón.

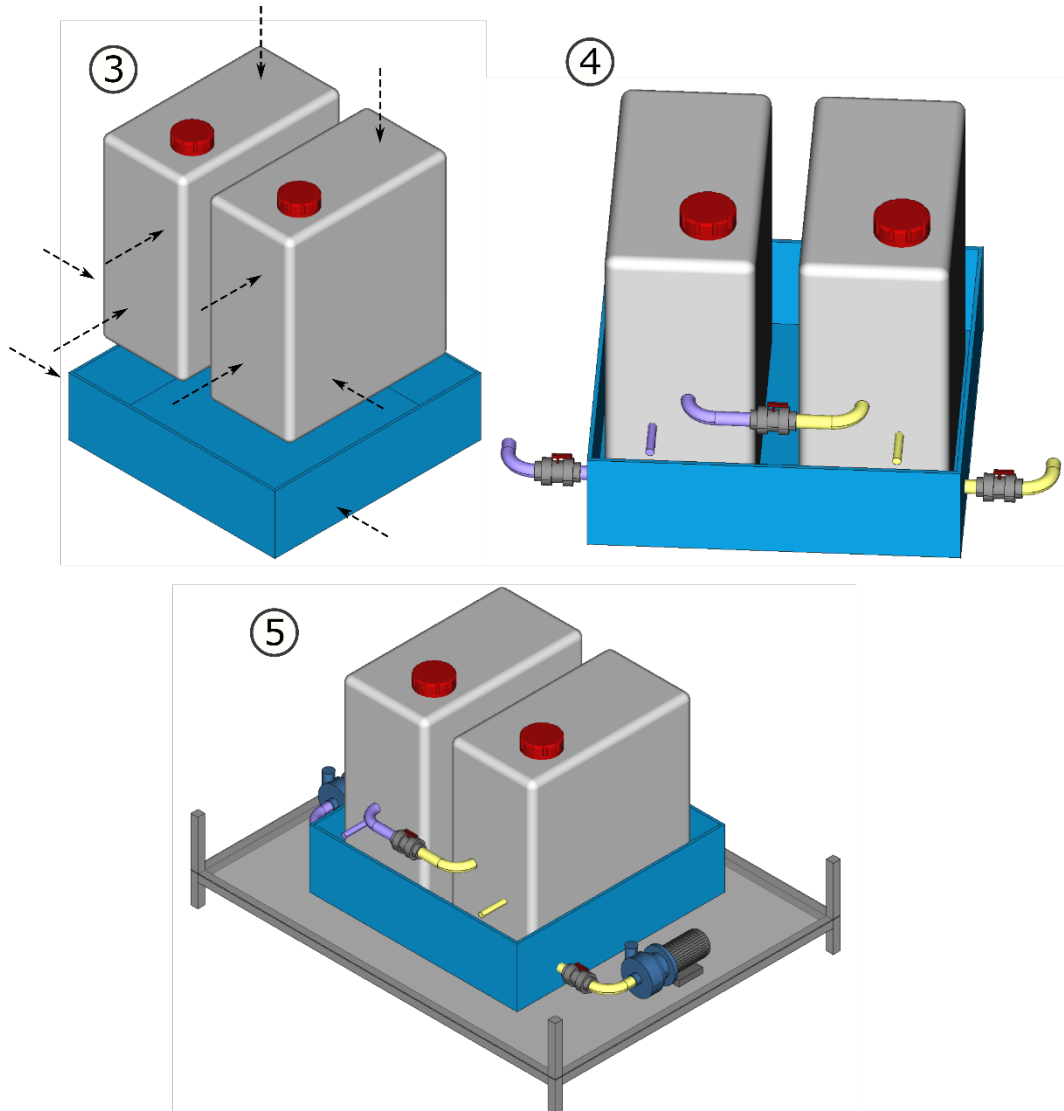


Figura 4.2. Instalación de bombas, depósitos y cubeto en el armazón, instalación de los primeros tramos de tubería. Fuente: Elaboración propia.

6 - Instalar los tramos de impulsión de ambas bombas, los tramos de *bypass* y los tramos de tubería que conducen a las entradas del *stack*, incluyendo los colectores y los tubos flexibles, además de la instrumentación necesaria (sensores de estado de

carga, viscosidad y conductividad del electrolito, caudalímetros, medidores de presión y temperatura a la entrada del *stack*).

7 – Instalar los tramos de retorno del *stack* a los respectivos depósitos, con la instrumentación correspondiente (medidores de presión y temperatura a la salida del *stack*).

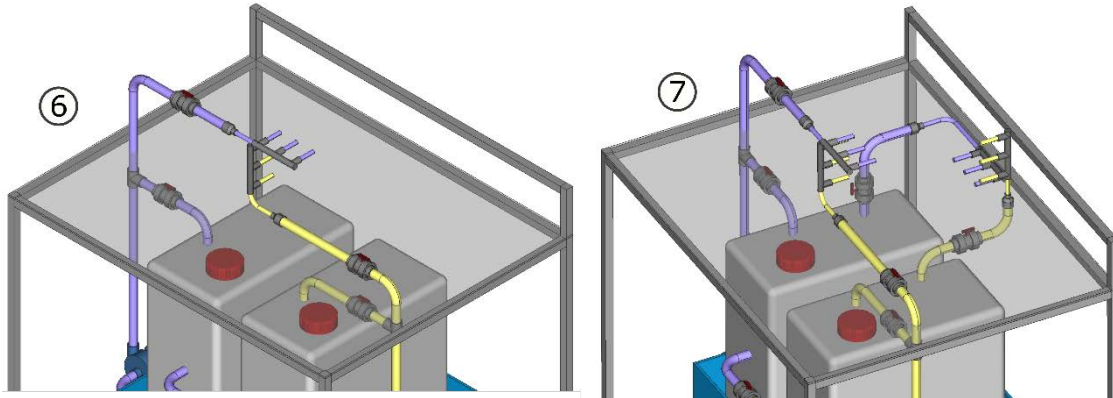


Figura 4.3. Instalación de los tramos de tubería de bypass, entrada y salida al *stack*.
Fuente: Elaboración propia.

8 – Colocar el *stack* a cierta altura (facilitar la instalación de entradas y salidas) en una bandeja para evitar vertidos sobre el forjado superior del armazón, conectar las líneas de entrada y salida de ambas líneas.

9 – Instalar las líneas de nitrógeno y escape de seguridad a la atmósfera en la parte superior de los depósitos.

10 – Instalar el equipo informático y los armarios eléctricos, así como el equipo de medición de los parámetros de la batería.

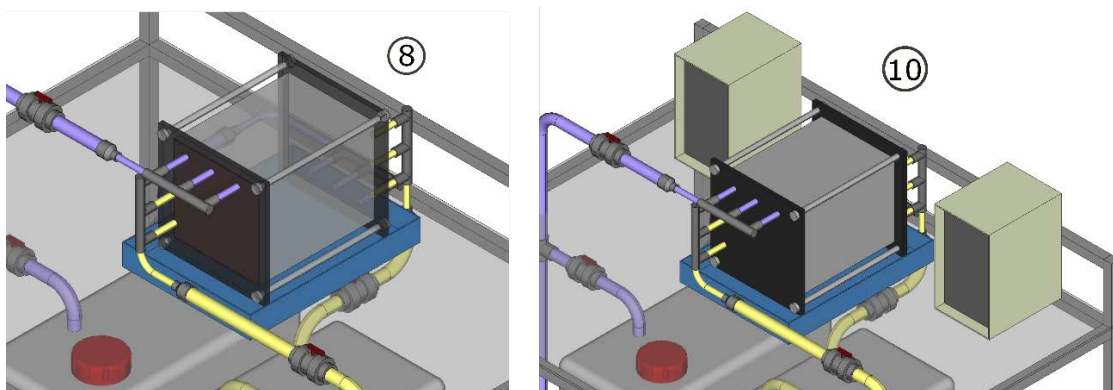


Figura 4.4. Conexión del *stack* a la red de tuberías e instalación del equipo informático y eléctrico. Fuente: Elaboración propia.

11 – Trasladar la instalación a su lugar de operación y retirar las ruedas abatibles.

12 – Por último, elaborar los electrolitos e introducirlos en los depósitos.

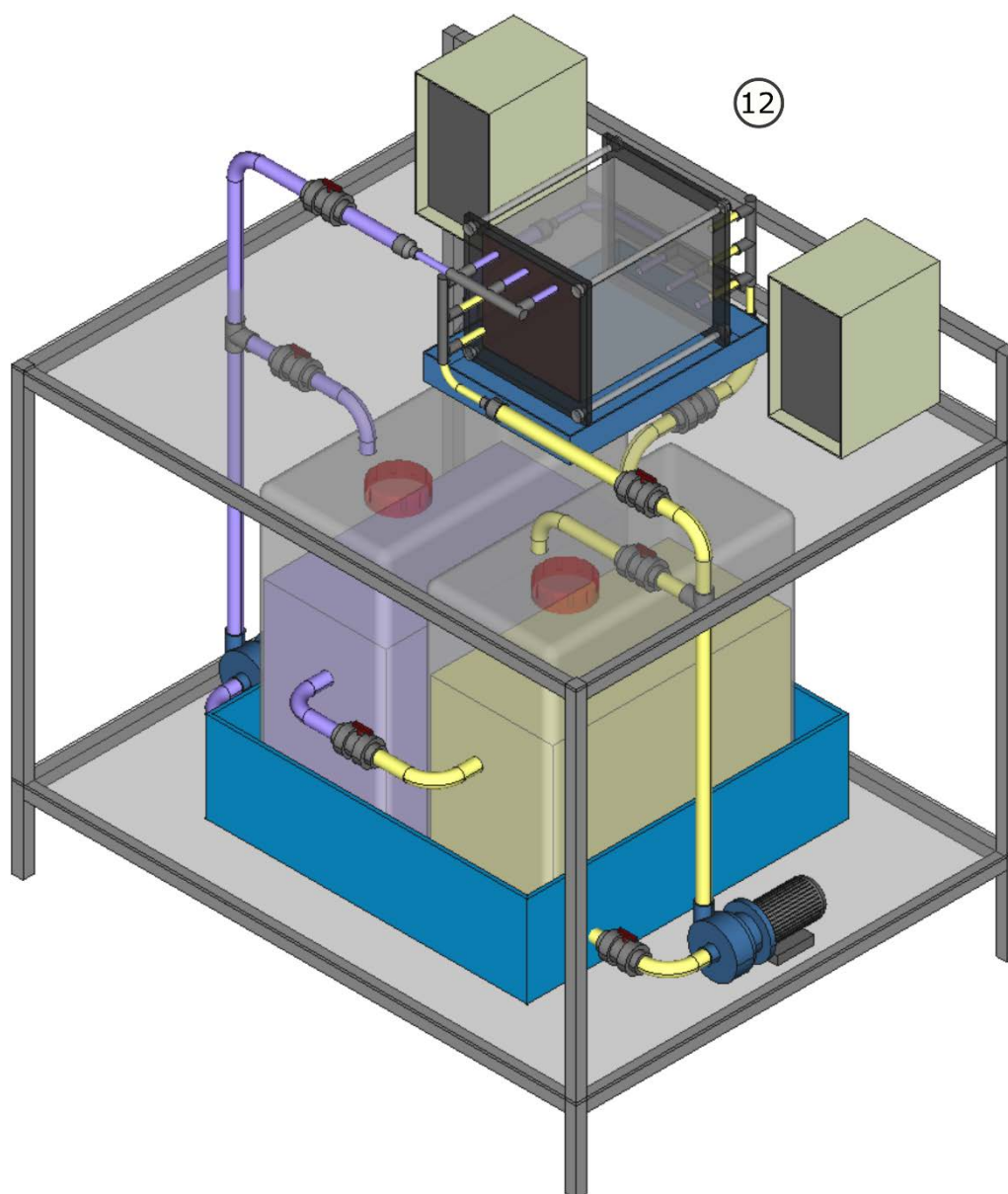


Figura 4.5. Representación completa de la instalación de la RFB. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Trabajo con una RFB de menor escala

Para familiarizarse con la tecnología de baterías de flujo redox, se adquiere una batería monocelda de menor capacidad y potencia [71] que la que se construirá, con el fin de utilizarla como prototipo y realizar con ella diversas mediciones y experimentos.

En este apartado se tratará tanto el montaje de esta batería, como la generación de electrolitos y mediciones de pérdida de presión en la celda y de parámetros de operación de la batería.

4.2.1. Montaje de la instalación para RFB monocelda

Dadas las dimensiones de la batería, la instalación y el montaje de la misma va a ser considerablemente más simple que el de la RFB de 5 kW. Como el objetivo es medir la salida de la batería, no se instalan caudalímetros, sensores de temperatura, ni otros instrumentos de medida. Se adquiere una bomba peristáltica (los caudales necesarios son varios órdenes de magnitud menores que los requeridos en la batería de 5 kW) con dos rotores independientes [72] (figura 4.6), con la que se bombean por separado los dos electrolitos. La bomba presenta dos potenciómetros graduados para regular el régimen de giro de cada rotor, calibrándose ambos para conocer el caudal que se obtiene para las distintas posiciones de los mismos.



Figura 4.6. Bomba peristáltica Dinko, en las instalaciones del LIFTEC.

Aunque la celda ya viene ensamblada con todos sus componentes, se construyó un utillaje para apretarla (figura 4.7), asegurándose así que no se produzcan fugas por cierre deficiente. Una vez ensamblada la celda con el utillaje, se colocó en el interior de una bandeja de plástico para retener posibles vertidos.



Figura 4.7. Utillaje de cierre manual a presión, en las instalaciones del LIFTEC.

Por último, se conectaron las entradas y salidas de la celda a la bomba y a los depósitos (en este caso frascos de vidrio con tomas de entrada y salida en la tapa) mediante tubo de plástico flexible, y las placas colectoras de corriente al equipo de medición de baterías. Un detalle de la instalación de la monocelda con las conexiones de fluidos y eléctricas puede apreciarse en la figura 4.8.



Figura 4.8. Instalación para la monocelda en el LIFTEC.

4.2.2. Generación de los electrolitos

A continuación, se producen los dos electrolitos en la propia instalación de la monocelda. Para ello se prepara una disolución de ácido sulfúrico y vanadio (IV). Al ser menor la potencia de la batería no es necesario añadir ácido fosfórico a la disolución como estabilizante, pues la temperatura del electrolito no debe aumentar notablemente, y, por lo tanto, no existe riesgo de precipitaciones de vanadio.

Una vez introducida la disolución de vanadio (IV) en ambos frascos, se hace circular con la bomba y se aplica una diferencia de potencial en las placas colectoras de corriente de la batería. La disolución es de un color azul intenso, como puede verse en la figura 4.9.

Según la ecuación de Nernst (ecuación 2.4), el potencial depende del estado de carga, por lo que a medida que la electrólisis va teniendo lugar y se van generando los dos electrolitos (una disolución de vanadio (V) por un lado, y una de vanadio (II) por otro) y aumenta el estado de carga de la batería, también aumenta la tensión que se debe aplicar para que la reacción siga produciéndose. En la figura 4.10 se muestra la evolución del voltaje y la densidad de corriente durante el proceso, donde se aprecia el incremento de la tensión hasta un momento donde se limita para que no siga aumentando y se produzcan reacciones secundarias indeseadas (oxidación del agua a O_2 , oxidación de los electrodos de carbono a CO_2 ...). Una vez el voltaje alcanza el valor límite, la corriente empieza a descender al disminuir la cantidad de electrolito que aún

no ha reaccionado, hasta estabilizarse. Los electrolitos se consideran completamente cargados cuando la densidad de corriente se estabiliza con un valor algo superior a 5 mA/cm^2 (figura 4.10). Con este procedimiento, se genera el doble de volumen de un electrolito ($\text{V}^{4+} \rightarrow \text{V}^{5+} + e^-$) que de otro ($\text{V}^{4+} + 2e^- \rightarrow \text{V}^{2+}$), ya que para la reducción a vanadio (II) es necesario transferir el doble de electrones.

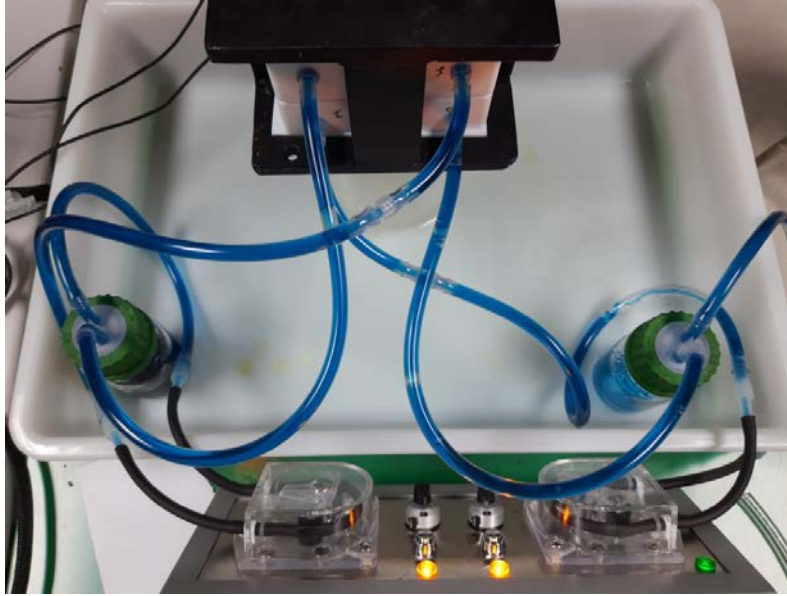


Figura 4.9. Generación de los electrolitos, inicio del proceso. Puede verse como en ambas líneas se tiene la misma disolución, de color azul intenso.

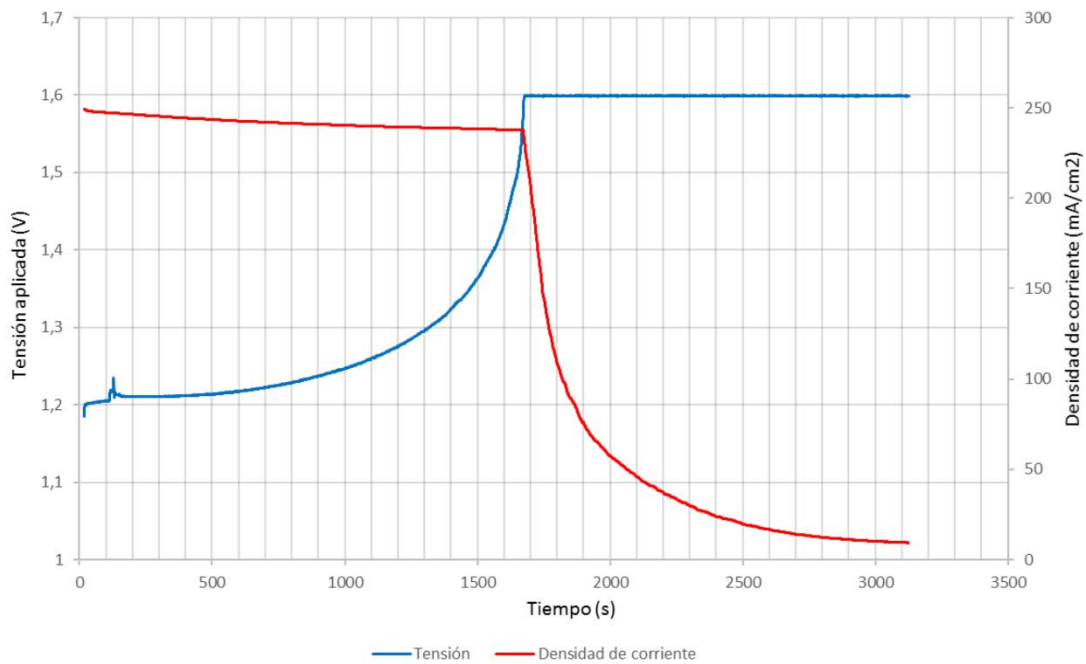


Figura 4.10. Evolución de la tensión y corriente aplicadas durante la producción de los electrolitos. Fuente: Elaboración propia.

Una vez finalizado el proceso, se obtienen los dos electrolitos (figura 4.11). La disolución de vanadio (II), de color violeta, es el electrolito negativo, mientras que el positivo, de color amarillo, es la disolución de vanadio (V).

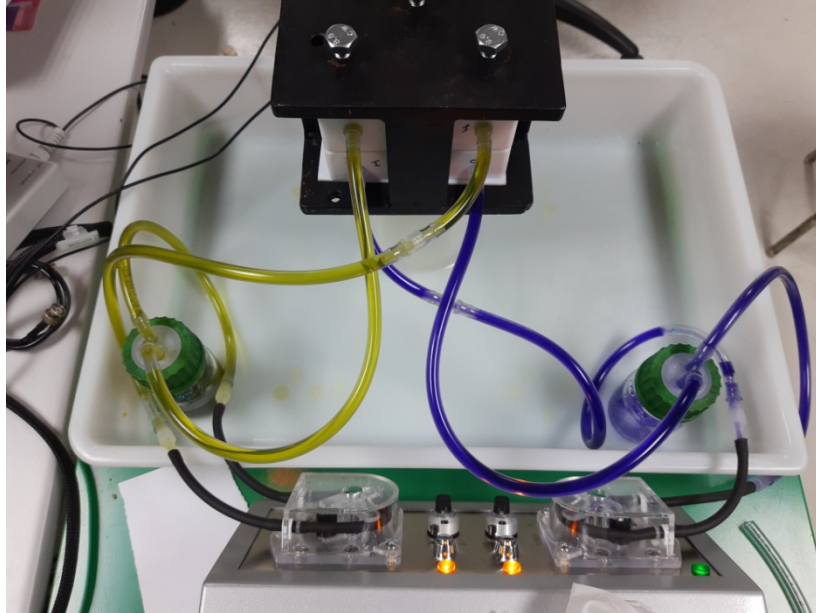


Figura 4.11. Generación de los electrolitos, fin del proceso, puede verse como las disoluciones de cada línea son distintas, y la batería se encuentra cargada.

4.2.3. Operación de la batería monocelda

Una vez producidos los electrolitos, se procede a realizar varias tandas de descarga y carga de la batería para evaluar su comportamiento. En la figura 4.12 se muestra la evolución de la tensión frente al tiempo durante uno de los ciclos de carga-descarga, obtenida mediante el equipo de monitorizado de la batería.

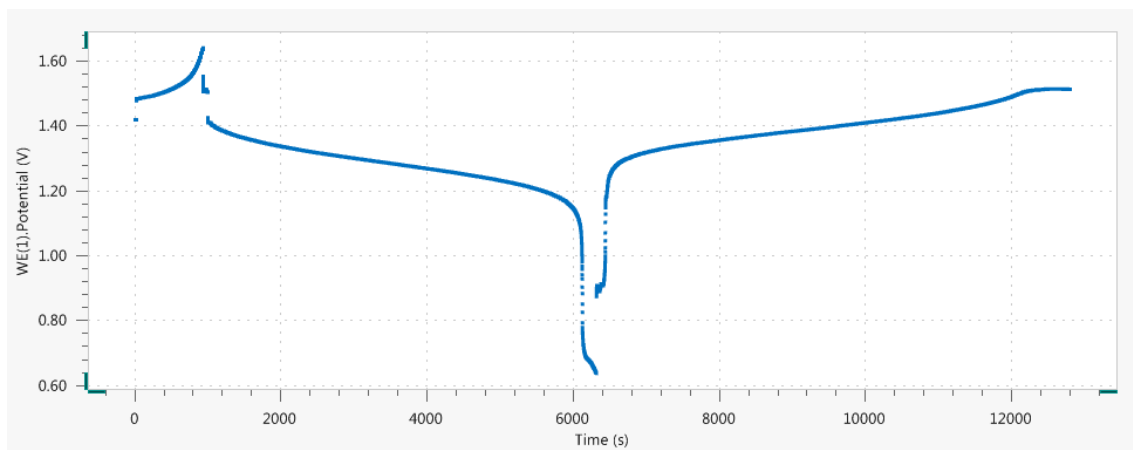


Figura 4.12. Operación de la monocelda. Tensión de la batería en ciclos de carga y descarga.
Fuente: LIFTEC.

Durante la descarga, el tiempo "útil" de la batería es el que proporciona un voltaje aproximadamente constante, tomando valores entre 1,4 y 1,2 V, en función del estado de carga. Como se aprecia en la figura 4.12, la capacidad de la batería es algo superior a 5000 segundos trabajando a 0,1 A/cm², valor similar al estimado para los volúmenes y concentraciones de los electrolitos empleados.

4.2.4. Medidas de presión de la batería monocelda

Tras realizar sucesivos ciclos de carga y descarga, se vacía y limpia la batería de electrolito, para la realización de diversas medidas de presión diferencial en el *stack* de la monocelda, empleando agua como fluido de trabajo, y solo en una de las líneas. Las medidas se toman en los puntos del potenciómetro 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 y 500, respectivamente (los caudales en dichos puntos son conocidos, ya que se calibró la bomba en el laboratorio). En la figura 4.13 se muestra el montaje para realizar las mediciones.

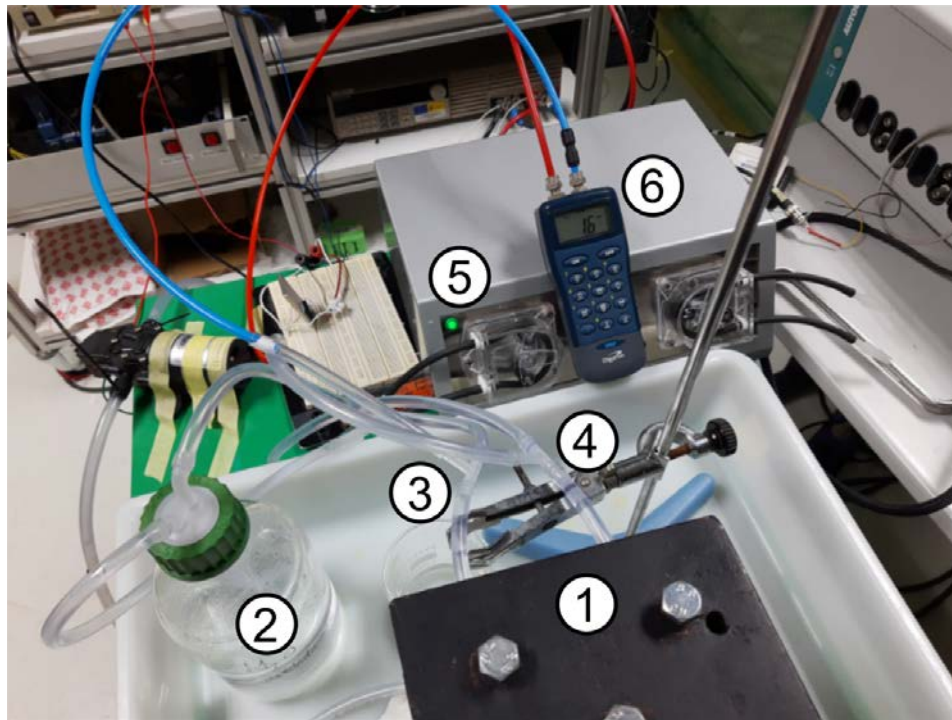


Figura 4.13. Toma de medidas de presión diferencial en RFB monocelda en el LIFTEC.
Leyenda: 1- Stack. 2- Depósito. 3- Toma de baja presión (salida del stack). 4- Toma de alta presión (entrada del stack). 5- Bomba peristáltica. 6- Instrumento de medición.

Las primeras medidas de presión diferencial se efectúan únicamente con las placas instaladas, sin colocar el electrodo en el marco de flujo. El procedimiento seguido (en estas medidas y en las siguientes con electrodo) consiste en realizar para cada punto tres tandas de medidas, obteniendo los valores máximo y mínimo en cada una de las tandas, con los que se obtiene un promedio de pérdida de presión para cada caudal. Los resultados se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Medidas de presión diferencial del stack sin electrodo.

Caudal (mL/min)	Tanda 1		Tanda 2		Tanda 3		ΔP (mbar)
	ΔP_{\min} (mbar)	ΔP_{\max} (mbar)	ΔP_{\min} (mbar)	ΔP_{\max} (mbar)	ΔP_{\min} (mbar)	ΔP_{\max} (mbar)	
20,4	8,00	12,00	9,0	12,00	9,00	13,00	10,50
30,4	13,00	18,00	14,00	18,00	14,00	18,00	15,83
40,3	20,00	24,00	19,00	23,00	19,00	22,00	21,17
50,3	27,00	30,00	27,00	30,00	26,00	29,00	28,17
60,2	32,00	36,00	30,00	35,00	32,00	37,00	33,67
70,1	38,00	42,00	38,00	41,00	39,00	43,00	40,17
80,1	45,00	50,00	47,00	49,00	49,00	52,00	48,67
90,0	53,00	57,00	52,00	57,00	53,00	59,00	55,17
99,9	63,00	63,00	60,00	64,00	63,00	69,00	63,67

Como no existe un electrodo poroso en la celda, se espera una evolución cuadrática de la pérdida de presión con el caudal. Efectivamente, en la figura 4.14 se aprecia la forma parabólica y el elevado índice R^2 de las medidas empleando una línea de tendencia polinómica de grado dos (para caudal cero, la pérdida de presión es nula, por lo que la línea debe pasar por el origen).

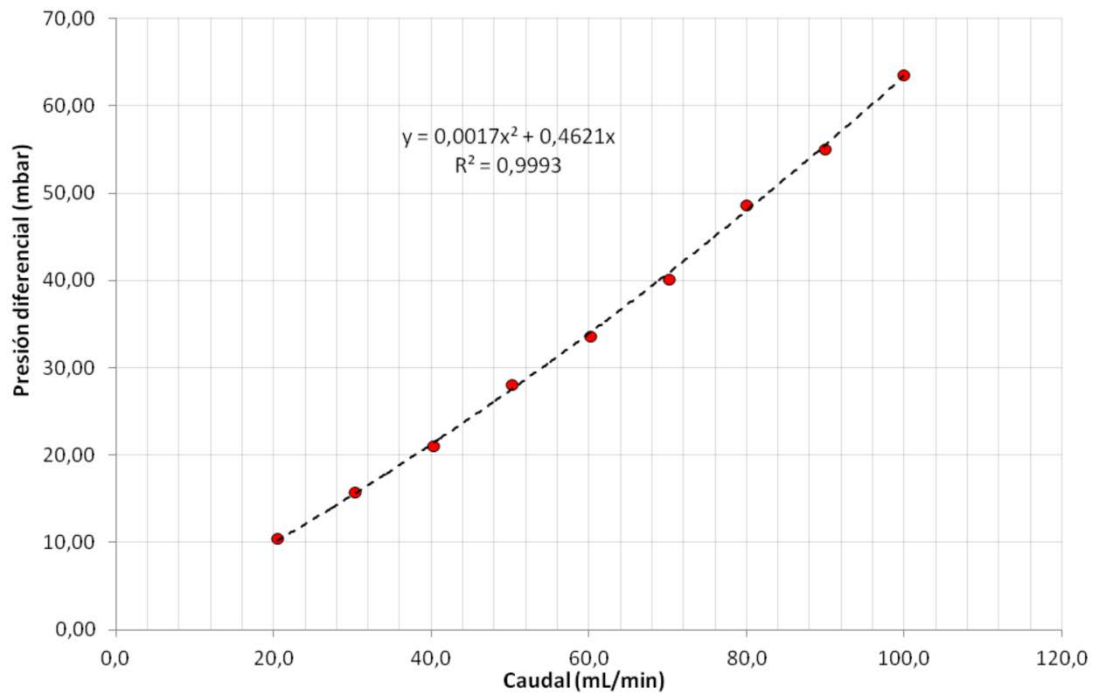


Figura 4.14. Evolución de la pérdida de presión en la celda sin electrodo conforme varía el caudal de agua. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se coloca el electrodo en la celda, y se toman medidas siguiendo el mismo procedimiento. La pérdida de presión en el electrodo aislado se determina restando al promedio de las medidas efectuadas a la celda con electrodo, el promedio de las medidas de la celda sin electrodo, es decir:

$$\Delta P_{\text{electrodo}} = \Delta P_{\text{placa+electrodo}} - \Delta P_{\text{placa}} \quad (4.1)$$

Las distintas medidas obtenidas se adjuntan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Medidas de presión diferencial del stack con electrodo.

Caudal (mL/min)	Tanda 1		Tanda 2		Tanda 3		ΔP (mbar)	$\Delta P_{\text{electrodo}}$ (mbar)
	ΔP_{min} (mbar)	ΔP_{max} (mbar)	ΔP_{min} (mbar)	ΔP_{max} (mbar)	ΔP_{min} (mbar)	ΔP_{max} (mbar)		
20,4	27,00	32,00	26,0	31,00	28,00	32,00	29,33	18,83
30,4	39,00	45,00	39,00	43,00	39,00	43,00	41,33	25,50
40,3	53,00	58,00	54,00	56,00	56,00	60,00	56,17	35,00
50,3	63,00	73,00	69,00	74,00	71,00	74,00	70,67	42,50
60,2	86,00	90,00	85,00	91,00	87,00	94,00	88,83	55,17
70,1	101,00	107,00	103,00	108,00	106,00	111,00	106,00	65,83
80,1	124,00	130,00	122,00	128,00	126,00	131,00	126,83	78,17
90,0	141,00	148,00	144,00	150,00	147,00	152,00	147,00	91,83
99,9	162,00	168,00	169,00	172,00	168,00	172,00	168,50	104,83

En la figura 4.15 se representa la evolución de la presión diferencial en el electrodo aislado. Según la ecuación 2.28, la pérdida de presión en el electrodo poroso es proporcional al caudal, siendo también cero cuando el caudal es nulo. Se representa una línea de tendencia lineal y que pasa por el origen, pudiéndose ver como el índice R^2 es elevado. A pesar de disponer de las medidas, no se comprueban los resultados que se obtendrían con la ecuación 2.28, puesto que el electrodo que se empleó estaba usado y se desconocían los parámetros del material, tales como su porosidad o su diámetro medio de fibra.

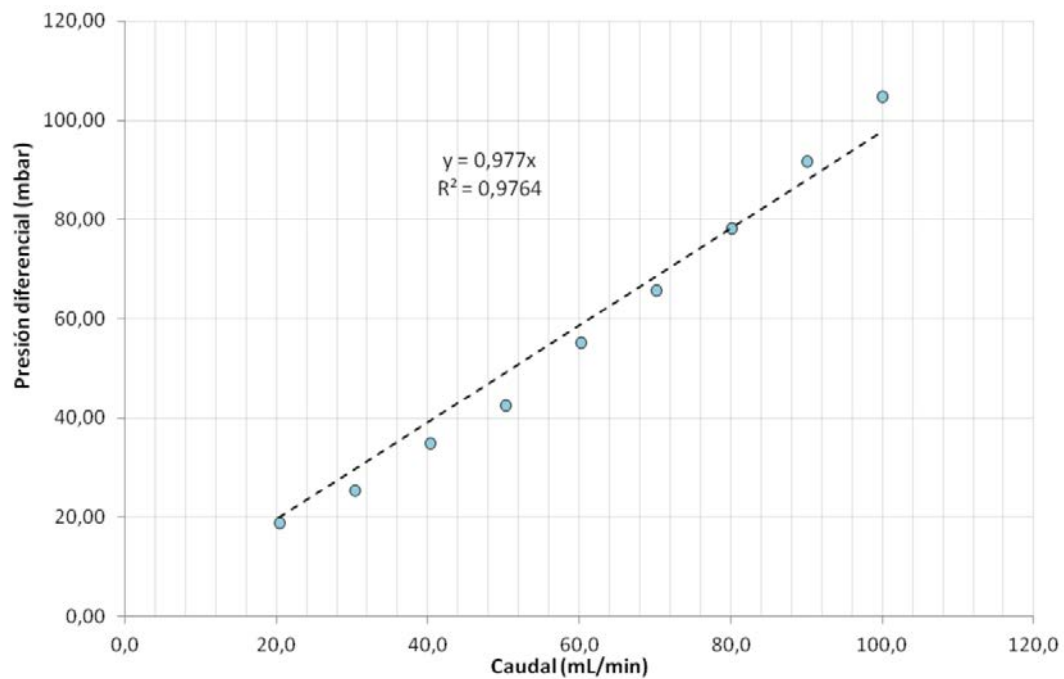


Figura 4.15. Evolución de la pérdida de presión en el electrodo aislado conforme varía el caudal de agua. Fuente: Elaboración propia.

Conforme la ejecución de la RFB de 5 kW avance, se caracterizará en el LIFTEC el material de los electrodos a utilizar en la batería, para determinar con precisión los parámetros de interés del mismo.

5. Conclusiones

En este apartado se van a presentar los principales resultados y las conclusiones a las que se ha llegado durante el diseño de una instalación para una batería de flujo redox de vanadio.

Tras un análisis detallado de la bibliografía, se ha comprobado la utilidad de las baterías de flujo redox como sistema de almacenamiento de energía, especialmente indicadas para suplir a las cada vez más necesarias fuentes renovables en periodos de baja producción de éstas. Se han visto los principios de funcionamiento de esta tecnología, comprendiendo los distintos elementos que forman una celda donde tienen lugar las reacciones químicas y sus funciones, y los componentes de los que consta una instalación de batería de flujo. Además, se han analizado otras instalaciones ya construidas de distinta escala que también usan disoluciones de vanadio como electrolitos, valorando las experiencias disponibles en el diseño de este tipo de instalaciones.

Una vez fijadas la potencia y capacidad de la batería en 5 kW y 10 kW·h, respectivamente, se ha determinado que se necesitan 47 celdas en la batería para que, trabajando a una densidad de corriente de $0,1 \text{ A/cm}^2$, se alcance un voltaje medio de 56 V. Para asegurar 2 horas de trabajo en estas condiciones se necesitan 324 litros de cada uno de los electrolitos, los cuales se almacenan en sendos depósitos de 400 L. Durante la operación, y con el fin de asegurar una corriente constante, el caudal que debe bombearse oscila entre 12 y 50 L/min, en función del estado de carga de la batería.

Se calculan las pérdidas de carga del electrolito a su paso por los distintos componentes de la batería, obteniéndose un valor de alrededor de 87 kPa para máximo caudal. Se ha comprobado que la práctica totalidad de la pérdida de presión tienen lugar en los electrodos porosos, donde se producen las reacciones electroquímicas. Atendiendo a estos cálculos se han seleccionado las bombas Finish Thompson modelo DB6H, corroborando mediante sus curvas características que son capaces de proporcionar suficiente presión y caudal a la instalación.

Atendiendo a la velocidad y al régimen de flujo del electrolito, se seleccionan las tuberías de la instalación con un diámetro interno de 50 mm. El diámetro se reduce en la entrada y salida del *stack* para facilitar la conexión con este. Una vez dimensionada la red de tuberías, se ha determinado con elevada exactitud que la pérdida de presión que tiene lugar en la instalación es de 118 kPa, correspondiendo a las líneas de bombeo de electrolito un 26% de estas pérdidas.

La totalidad de los componentes que operen en contacto con los electrolitos deben ser de plástico (depósitos, tuberías...), dado el carácter ácido y corrosivo de éstos.

La instalación externa se dispone en una estructura metálica con dos niveles construida mediante perfiles de aluminio, ubicándose los depósitos y bombas en el nivel inferior, reforzado debido al mayor peso que debe soportar, y el *stack* a una altura mayor.



Se considera imprescindible monitorizar parámetros como estado de carga, caudal de electrolito, temperatura y presión a entrada y salida del *stack*, habiéndose seleccionado para cada uno de ellos su correspondiente equipo de medida comercial.

Una vez consultada la legislación vigente en materia de trabajo con sustancias peligrosas, se ha llegado a la conclusión de que cualquier operario de la batería deberá llevar mono, botas de goma, guantes y pantalla facial para garantizar su seguridad.

Los costes de la instalación se han estimado en 39.000 €, repartidos entre el armazón, el electrolito, la instrumentación y la instalación externa. Los costes de los distintos componentes se han calculado tomando como base los precios de los suministradores. Aproximadamente tres cuartas partes del coste total se reparte entre las sales de vanadio para producir los electrolitos y los equipos de instrumentación, suponiendo menos de un 10% del presupuesto los elementos que componen la red de tuberías, siendo las bombas con un precio de 815 € (por cada una) los equipos más costosos de ésta.

Para el montaje de la batería, se recomienda ubicar los distintos componentes en el armazón con ruedas tras haberlo construido atornillando los perfiles, para después instalar los distintos tramos de tubería. El llenado de los depósitos debe hacerse una vez la instalación se encuentre en su emplazamiento definitivo y con las ruedas retiradas, ya que el electrolito supone más de 800 kg de peso, y no es conveniente desplazar la instalación con esta carga adicional.

Se ha construido en el LIFTEC una instalación para una batería de menor escala y una sola celda para realizar distintos experimentos. Se ha comprobado que el proceso de generación del electrolito a partir de vanadio (IV) es práctico a escala de laboratorio, pero para la instalación de 5 kW se considera más atractivo producirlo a partir de óxido de vanadio (V) o adquirirlo ya fabricado. Se ha corroborado que el voltaje promedio medido en el laboratorio es superior a los 1,2 V estimados para los cálculos, lo que incrementará ligeramente la energía capaz de almacenar la batería. Por último, se ha medido la presión diferencial en la celda con electrodo y sin él, obteniéndose 105 y 64 mbar respectivamente, a un caudal de 100 mL/min, comprobándose que las expresiones de cálculo empleadas en el trabajo modelan adecuadamente la evolución de la pérdida de presión con el caudal.



5.1. Trabajo futuro

Con el diseño de la instalación de la RFB de 5 kW realizado en este trabajo fin de grado, se procederá a su construcción en el LIFTEC, con lo que una de las líneas de trabajo futuro está relacionada con la operación de las baterías que se monten en este banco de ensayos.

A corto plazo, se concluirá el diseño de una monocelda de pequeña escala y su correspondiente instalación (bombas, depósitos, tuberías...) utilizando los códigos desarrollados en este TFG. El propósito es ensayar y evaluar en esta instalación diversos componentes, tales como membranas, electrodos, composición de electrolitos, así como el propio diseño de la celda.

Se realizarán ensayos con distintos diseños de marcos de flujo, variando las dimensiones de los rebajes y colectores, buscando la distribución de flujo que resulte más adecuada. Una vez se fijen los materiales y diseño de los distintos componentes de la celda, el siguiente paso consistirá en incrementar el número de celdas, pasando a tener un *stack*, y operar con él para comprobar que no hay fugas de electrolito, perfeccionar aspectos tales como los sistemas de cierre, etc.

Una vez conformes con los resultados obtenidos con el *stack* de pequeña escala, se continuará en esa línea, en esta ocasión aumentando la superficie activa de los electrodos y por ende del *stack*, para analizar su comportamiento durante la operación.

Uno de los objetivos conseguidos en este TFG es el de lograr cierta modularidad en la instalación, para poder cambiar un *stack* por otro de distinto tamaño o número de celdas y seguir operando. En esta línea de actuación se pretende utilizar la instalación diseñada en este trabajo para evaluar baterías de diferente potencia, tras refinar diseños de componentes y sistemas auxiliares habiéndolos ensayado previamente en la instalación de menor escala que se construirá.

6. Bibliografía

- [1] Website, Red Eléctrica de España, (2019).
<https://www.ree.es/es/datos/balance/balance-electrico> (accessed November 25, 2019).
- [2] H. Lund, G. Salgi, The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems, *Energy Convers. Manag.* 50 (2009) 1172–1179.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.01.032>.
- [3] M. Faisal, M.A. Hannan, P.J. Ker, A. Hussain, M. Bin Mansor, F. Blaabjerg, Review of Energy Storage System Technologies in Microgrid Applications: Issues and Challenges, *IEEE Access.* 6 (2018) 35143–35164.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2841407>.
- [4] S. Rehman, L.M. Al-Hadhrani, M.M. Alam, Pumped hydro energy storage system: A technological review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 44 (2015) 586–598. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.040>.
- [5] L.F. Cabeza, *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, 2016.
<https://doi.org/10.1016/c2013-0-16453-7>.
- [6] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke, Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation, *Appl. Energy.* 137 (2015) 511–536.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>.
- [7] J. Zhang, Huamin; Li, Xianfeng; Zhang, *Electrochemical Energy Storage and Conversion - Redox Flow Batteries, Fundamentals and Applications*, in: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2018.
- [8] M. Skyllas-Kazacos, M.H. Chakrabarti, S.A. Hajimolana, F.S. Mjalli, M. Saleem, Progress in flow battery research and development, *J. Electrochem. Soc.* 158 (2011) 7–10. <https://doi.org/10.1149/1.3599565>.
- [9] M. Guarnieri, A. Trovò, A. D'Anzi, P. Alotto, Developing vanadium redox flow technology on a 9-kW 26-kWh industrial scale test facility: Design review and early experiments, *Appl. Energy.* 230 (2018) 1425–1434.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.021>.
- [10] L.H. Thaller, *Electrically Rechargeable Redox Flow Cells*, NASA Tech. Memo. (1974).
- [11] L.H. Thaller, *Electrically Rechargeable Redox Flow Cell*, United States Pat. US3996064A. (1976) 1–8.
- [12] M. Skyllas-Kazacos, M. Rychcik, R.G. Robins, A.G. Fane, New All-Vanadium Redox Flow Cell, *J. Electrochem. Soc.* 133 (1986) 1057–1058.
<https://doi.org/10.1149/1.2108706>.



- [13] D. Reed, E. Thomsen, B. Li, W. Wang, Z. Nie, B. Koeppel, J. Kizewski, V. Sprenkle, Stack developments in a kW class all vanadium mixed acid redox flow battery at the pacific northwest national laboratory, *J. Electrochem. Soc.* 163 (2016) A5211–A5219. <https://doi.org/10.1149/2.0281601jes>.
- [14] Website, Fraunhofer Institute for Chemical Technology, (2019). <https://www.ict.fraunhofer.de/en/comp/ae/rfb.html> (accessed November 26, 2019).
- [15] Website, Hydraredox, (2019). <https://es.hydraredox.com/> (accessed November 21, 2019).
- [16] Website, Zigor, (2019). <https://www.zigor.com/> (accessed November 20, 2019).
- [17] Website, VRB Power Systems, (2019). <https://vrbenenergy.com/> (accessed November 20, 2019).
- [18] Website, Sumitomo Electric Industries, (2019). <https://global-sei.com/> (accessed November 20, 2019).
- [19] Website, Mitsubishi Chemical Corporation, (2019). <https://www.m-chemical.co.jp/en/index.html> (accessed November 20, 2019).
- [20] M. Huang, B. Hu, D. Li, S. Xu, 100MW Class Vanadium Flow Battery Project Plan in China, *ECS Trans.* 89 (2019) 15–25. <https://doi.org/10.1149/08901.0015ecst>.
- [21] A. Trovò, F. Picano, M. Guarnieri, Comparison of energy losses in a 9 kW vanadium redox flow battery, *J. Power Sources.* 440 (2019) 227144. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227144>.
- [22] S. Kim, E. Thomsen, G. Xia, Z. Nie, J. Bao, K. Recknagle, W. Wang, V. Viswanathan, Q. Luo, X. Wei, A. Crawford, G. Coffey, G. Maupin, V. Sprenkle, 1 kW/1 kWh advanced vanadium redox flow battery utilizing mixed acid electrolytes, *J. Power Sources.* 237 (2013) 300–309. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.02.045>.
- [23] Q. Xu, T.S. Zhao, C. Zhang, Effects of SOC-dependent electrolyte viscosity on performance of vanadium redox flow batteries, *Appl. Energy.* 130 (2014) 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.034>.
- [24] A. Tang, J. Bao, M. Skyllas-Kazacos, Studies on pressure losses and flow rate optimization in vanadium redox flow battery, *J. Power Sources.* 248 (2014) 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.09.071>.
- [25] S. König, M.R. Suriyah, T. Leibfried, Innovative model-based flow rate optimization for vanadium redox flow batteries, *J. Power Sources.* 333 (2016) 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.09.147>.
- [26] X. Ma, H. Zhang, F. Xing, A three-dimensional model for negative half cell of the vanadium redox flow battery, *Electrochim. Acta.* 58 (2011) 238–246. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.09.042>.
- [27] F.M. White, *Fluid Mechanics*, McGraw Hill, 2000.



- [28] F. Barreras, A.M. López, A. Lozano, J.E. Barranco, Experimental study of the pressure drop in the cathode side of air-forced Open-cathode proton exchange membrane fuel cells, *Int. J. Hydrogen Energy*. 36 (2011) 7612–7620. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.149>.
- [29] E. Shashi Menon, *Piping Calculations Manual*, McGraw-Hill, 2005.
- [30] T.J. Tomadakis, Manolis M. ; Robertson, *Viscous Permeability of Random Fiber Structures: Comparison of Electrical and Diffusional Estimates with Experimental and Analytical Results*, *J. Compos. Mater.* (2005).
- [31] F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, Elsevier Ltd, 2013.
- [32] INSST, *Ácido Sulfúrico - Ficha*, Report. (2018).
- [33] CTR, *Hoja de datos de seguridad Ácido Sulfúrico*, (2005) 1–5. http://iio.ens.uabc.mx/hojas-seguridad/acido_sulfurico.pdf.
- [34] Website, *Depósito 400L para electrolito*, (2019). <http://www.novodinamica.com/es/cubetas-colectoras-y-bidones/bidones/deposito-400-l/20/59/483> (accessed October 31, 2019).
- [35] Universidad de Alicante, *Actuación en caso de fugas y derrames*, Report. (2004) 1–10.
- [36] Website, *Cubeto de retención*, (2019). <https://www.cubetosonline.com/es/cubetos-para-bidones/26-cubeto-retencion-para-4-bidones.html> (accessed October 31, 2019).
- [37] Website, *Perfil 45x45mm Bosch Rexroth*, (2019). <https://www.boschrexroth.com/es/es/productos/grupo-de-productos/tecnologia-de-montaje/elementos-basicos-de-mecanica/perfiles-soporte/perfil-soporte-ranura-10-reticulo-45/45x45l#> (accessed November 29, 2019).
- [38] Website, *Perfiles de aluminio 45x45mm RS*, (2019). <https://es.rs-online.com/web/p/tubos-y-puntales/3900048/> (accessed November 29, 2019).
- [39] Website, *Escuadra metálica Bosch Rexroth*, (2019). <https://es.rs-online.com/web/p/componentes-de-conexion/3901805/> (accessed November 29, 2019).
- [40] C.M. Colebrook, C.F.; White, *Experiments with fluid friction in roughened pipes*, *Proc. R. Soc. London. Ser. A - Math. Phys. Sci.* 161 (1937) 367–381. <https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0150>.
- [41] Website, *Finish Thompson DB Series*, (2019). <https://www.finishthompson.com/pumps/sealless-pumps/db-series-plastic-mag-drive-pumps/> (accessed December 8, 2019).
- [42] Website, *Finish Thompson DB6H*, (2019). <https://www.finishthompson.com/pumps/sealless-pumps/db-series-plastic-mag-drive-pumps/db6h/> (accessed December 8, 2019).
- [43] Website, *Poolaria*, (2019). <https://www.poolaria.com/> (accessed December 10, 2019).



- [44] Website, Tubería PVC diámetro 25 mm, (2019).
https://www.poolaria.com/tuberia-rigida-pvc/97-tubo-pvc-presion-pn16-gris-rigido.html#/2576-medida-o_25 (accessed December 10, 2019).
- [45] Website, Tubería PVC diámetro 50 mm, (2019).
https://www.poolaria.com/tuberia-rigida-pvc/97-tubo-pvc-presion-pn16-gris-rigido.html#/2579-medida-o_50 (accessed December 10, 2019).
- [46] Website, Tubería PVC diámetro 10 mm, (2019).
https://www.mwmaterialsworld.com/es/tubo-flexible-de-pvc-cristal.html?gclid=EAlaIQobChMllcvh9Oa15glVE5zVCh2iggenEAQYAiABEgKbGPD_BwE (accessed December 10, 2019).
- [47] Website, Válvula de bola diámetro 50 mm, (2019).
https://www.poolaria.com/valvulas-de-pvc/2239-valvula-de-bola-cepex-standard-pvc-u-pe-epdm-encolar.html#/2579-medida-o_50 (accessed December 10, 2019).
- [48] Website, Codo PVC 90° diámetro 25 mm, (2019).
https://www.poolaria.com/accesorios-de-pvc/316-codo-90-pvc-encolar.html#/2240-medida-o_25 (accessed December 10, 2019).
- [49] Website, Codo PVC 90° diámetro 50 mm, (2019).
https://www.poolaria.com/accesorios-de-pvc/316-codo-90-pvc-encolar.html#/2579-medida-o_50 (accessed December 10, 2019).
- [50] Website, Té PVC 90° diámetro 50 mm, (2019).
https://www.poolaria.com/accesorios-de-pvc/318-te-90-pvc-encolar.html#/2579-medida-o_50 (accessed December 10, 2019).
- [51] Website, Reducción cónica PVC diámetros 25-50 mm, (2019).
https://www.poolaria.com/accesorios-de-pvc/1061-reduccion-conica-pvc-encolar.html#/2330-medida-o_63_50_x_25 (accessed December 10, 2019).
- [52] Website, JSA Photonics, (2019).
- [53] Website, Sensores estado de carga, (2019).
- [54] Website, Omega, (2019). <https://es.omega.com/> (accessed December 16, 2019).
- [55] Website, Caudalímetro Omega serie FMG90, (2019).
<https://es.omega.com/pptst/FMG90.html> (accessed December 16, 2019).
- [56] Website, Mouser Electronics, (2019). <https://www.mouser.es/> (accessed December 16, 2019).
- [57] Website, Transductor de presión, (2019).
<https://www.mouser.es/ProductDetail/Measurement-Specialties/MSP-300-100-P-3-N-1?qs=Pz4gaf3%252B8zxTYNsaorwRog==> (accessed December 16, 2019).
- [58] Website, TC Sensores, (2019). <https://www.tcdirect.es/default.aspx> (accessed December 16, 2019).
- [59] Website, Termopar aislado con FEP, (2019).
https://www.tcdirect.es/Default.aspx?level=2&department_id=210/1 (accessed December 16, 2019).



December 16, 2019).

- [60] Website, EPS Stromversorgung, (2019). <https://www.eps-germany.de/shop/> (accessed December 16, 2019).
- [61] Website, Equipo de medición para baterías E/PSB 9080-240 3U, (2019). <https://www.eps-germany.de/shop/AC/DC/E/PSB-9000-3U-Bidirectional-DC-Power-Supply-with-energy-recovery-5-240-kW/E-PSB-9080-240-3U-Bidirectional-DC-Power-Supply-energy-recovery::3002.html?language=en> (accessed December 16, 2019).
- [62] Website, Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, (2019). <https://www.insst.es/> (accessed December 17, 2019).
- [63] Website, Real Decreto 656/2017 del 23 de junio, (2019). <https://www.boe.es/eli/es/rd/2017/06/23/656> (accessed December 17, 2019).
- [64] Website, Embellecedor de plástico para perfiles, (2019). <https://es.rs-online.com/web/p/tapones-y-topes-para-tubos/3900183/> (accessed December 17, 2019).
- [65] Website, Emparrillado metálico, (2019). <http://www.entramadosdelta.es/Productos/Electrosoldado/electrosoldado.html> (accessed December 17, 2019).
- [66] Website, Armario para conexiones eléctricas, (2019). <https://es.rs-online.com/web/p/cajas-de-pared/1833529/> (accessed December 18, 2019).
- [67] Website, Ácido sulfúrico 98%, (2019). <https://www.itwreagents.com/iberia/es/product/Ácido+sulfúrico+96%25+para+análisis%2C+iso/131058> (accessed December 18, 2019).
- [68] Website, Ácido fosfórico 85%, (2019). <https://www.itwreagents.com/iberia/es/product/bioproseso/Ácido+orto-fosfórico+85%25+%28usp-nf%2C+bp%2C+ph.+eur.%29+puro%2C+grado+farma/141032> (accessed December 18, 2019).
- [69] Website, Sulfato de vanadio(IV) hidratado, (2019). <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/233706?lang=es®ion=ES> (accessed December 18, 2019).
- [70] Website, Óxido de Vanadio (V), (2019). <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/223794?lang=es®ion=ES> (accessed December 18, 2019).
- [71] Website, Stack monocelda, (2019). <https://www.mtixtl.com/VanadiumRedoxFlowCellSingleSplitUnitforBatteryRandD-EQ-VRB-C-LD.aspx> (accessed December 19, 2019).
- [72] Website, Bomba peristáltica Dinko, (2020). https://www.dinko.es/es/bombas-peristálticas-múltiples-cabezales_8737 (accessed January 8, 2020).

Lista de figuras

Figura 1.1. Evolución de la producción eléctrica nacional según su origen en el periodo 2007-2019. Fuente: Red Eléctrica de España [1]	1
Figura 1.2. Diagrama capacidad-potencia (diagrama de Ragone) en el que se aprecia los rangos de operación de los distintos sistemas de almacenamiento de energía. Fuente: Montiel (Documento interno LIFTEC)	3
Figura 1.3. Representación de una batería de flujo redox. Fuente: Elaboración propia	5
Figura 1.4. Componentes de una celda de batería de flujo redox. Fuente: Guarnieri [9]	6
Figura 1.5. Instalación de batería de flujo redox de 9kW/26kWh del Laboratorio de Almacenamiento y Conversión de Energía Electro-química de la Universidad de Padua. Fuente: Guarnieri [9]	7
Figura 1.6. Instalación de batería de flujo redox de 1kW del Pacific Northwest National Laboratory de Richland. Fuente: Reed [13]	8
Figura 1.7. Instalación de laboratorio del Fraunhofer ICT en Pfinztal. Fuente: Fraunhofer ICT [14]	8
Figura 1.8. Operarios en una instalación de VRFB de 3MW/12MWh en Hubei, China. Fuente: Huang [20]	9
Figura 2.1. Marco de flujo y electrodo de una RFB monocelda empleada en el LIFTEC	11
Figura 2.2. Evolución del caudal de los electrolitos en función del estado de carga para asegurar un factor de flujo constante, tanto para carga como descarga de la batería. Fuente: Elaboración propia	16
Figura 2.3. Representación simplificada del stack de la batería. Fuente: Elaboración propia	19
Figura 2.4. Visualización explosionada de los colectores, se representan con un color distinto según circule por ellos un electrolito u otro. Fuente: Elaboración propia	19
Figura 2.5. Configuraciones del flujo de electrolito a través del stack. Fuente: Elaboración propia	20
Figura 2.6. Representación gráfica de un marco de flujo, donde se aprecia un colector con su correspondiente rebaje comunicando con la ranura del electrodo. Fuente: Elaboración propia	22



Figura 2.7. Esquema de una celda, donde puede verse el sentido en el que fluyen los dos electrolitos. Cada uno de ellos atraviesa uno de los dos marcos de flujo por las ranuras donde se colocan los electrodos, pero no se mezclan en ningún momento. Fuente: Elaboración propia	23
Figura 2.8. Representación de un marco de flujo con el electrodo ya en su interior. Puede verse el recorrido del electrolito a su paso por el marco. Fuente: Elaboración propia . . .	25
Figura 2.9. Depósito de plástico de 400 L para almacenar electrolito. Fuente: [16]	27
Figura 2.10. Cubeto de retención de plástico para los depósitos. Se retirará la rejilla y se introducirán en el interior. Fuente: [18]	28
Figura 2.11. Perfil de aluminio empleado para construir la estructura de la RFB. Fuente: [20]	28
Figura 2.12. Escuadra metálica para unir los perfiles de la estructura. Fuente: [21]	29
Figura 2.13. Representación gráfica de la estructura metálica donde se dispondrá la batería de flujo redox. Fuente: Elaboración propia	29
Figura 2.14. Esquema simplificado de la instalación hidráulica de la batería. Fuente: Elaboración propia	31
Figura 2.15. Bomba Finish Thompson DB6H. Fuente: [24]	33
Figura 2.16. Curvas del modelo DB6H. Fuente: Centrifugal-DB Series Curvebook [24]	34
Figura 2.17. Proceso de introducción y recogida de electrolito del stack. Puede verse la disminución de sección de las tuberías y la división del flujo. Fuente: Elaboración propia	35
Figura 2.18. Representación y detalles de la instalación de tuberías para los electrolitos, pueden apreciarse las bombas, depósitos, válvulas, etc. Fuente: Elaboración propia . . .	36
Figura 2.19. Representación de la línea 1 de electrolito. Fuente: Elaboración propia . . .	37
Figura 2.20. Obtención gráfica del coeficiente de pérdidas en función de la geometría del aumento progresivo de sección. Fuente: [10]	40
Figura 2.21. Obtención gráfica de los coeficientes de pérdidas de expansión y contracción abrupta, en función de la geometría. Fuente: [8]	41
Figura 2.22. Representación de la línea 2 de electrolito. Fuente: Elaboración propia . . .	42
Figura 2.23. Desglose de las pérdidas de presión en la instalación de la RFB, en valor y en porcentaje. Fuente: Elaboración propia	44
Figura 2.24. Tuberías de PVC para las líneas de electrolito. Fuente: [26,27]	45
Figura 2.25. Tubos flexibles de PVC para las líneas de electrolito. Fuente: [28]	45
Figura 2.26. Válvula de bola \varnothing 50 mm, se usará este modelo en todas las líneas. Fuente: [29]	46



Figura 2.27. Codo de PVC empleado en las líneas de electrolito. Fuente: [30,31]	46
Figura 2.28. Té de PVC empleada para unir las líneas generales con los bypass. Fuente: [32]	46
Figura 2.29. Reducción cónica concéntrica de PVC de diámetros 25-50 mm. Fuente: [33]	47
Figura 2.30. Ubicación de la instrumentación en la RFB. Fuente: Elaboración propia . . .	48
Figura 2.31. Sensores ópticos de JSA Photonics para medir el estado carga. Fuente: [37]	49
Figura 2.32. Caudalímetro con interior de PVDF serie FMG90 de Omega. Fuente: [39]	50
Figura 2.33. Transductor de presión 0-100 psi de Mouser Electronics. Fuente: [41]	50
Figura 2.34. Termopar aislado con FEP de TC Direct Sensores. Fuente: [43]	51
Figura 2.35. Equipo de medición de baterías E/PSB 9080-240 3U de EPS Stromversorgung. Fuente: [45]	51
Figura 4.1. Montaje del almacén de la instalación. Fuente: Elaboración propia	59
Figura 4.2. Instalación de bombas, depósitos y cubeto en el almacén, instalación de los primeros tramos de tubería. Fuente: Elaboración propia	60
Figura 4.3. Instalación de los tramos de tubería de bypass, entrada y salida al stack. Fuente: Elaboración propia	61
Figura 4.4. Conexionado del stack a la red de tuberías e instalación del equipo informático y eléctrico. Fuente: Elaboración propia	61
Figura 4.5. Representación completa de la instalación de la RFB. Fuente: Elaboración propia	62
Figura 4.6. Bomba peristáltica Dinko, en las instalaciones del LIFTEC	63
Figura 4.7. Utillaje de cierre manual a presión, en las instalaciones del LIFTEC	63
Figura 4.8. Instalación para la monocelda en el LIFTEC	64
Figura 4.9. Generación de los electrolitos, inicio del proceso. Puede verse como en ambas líneas se tiene la misma disolución, de color azul intenso	65
Figura 4.10. Evolución de la tensión y corriente aplicadas durante la producción de los electrolitos. Fuente: Elaboración propia	65
Figura 4.11. Generación de los electrolitos, fin del proceso, puede verse como las disoluciones de cada línea son distintas, y la batería se encuentra cargada	66



Figura 4.12. Operación de la monocelda. Tensión de la batería en ciclos de carga y descarga. Fuente: LIFTEC 66

Figura 4.13. Toma de medidas de presión diferencial en RFB monocelda en el LIFTEC. Leyenda: 1- Stack. 2- Depósito. 3- Toma de baja presión (salida del stack). 4- Toma de alta presión (entrada del stack). 5- Bomba peristáltica. 6- Instrumento de medición 67

Figura 4.14. Evolución de la pérdida de presión en la celda sin electrodo conforme varía el caudal de agua. Fuente: Elaboración propia 68

Figura 4.15. Evolución de la pérdida de presión en el electrodo aislado conforme varía el caudal de agua. Fuente: Elaboración propia 70

Figura A.1. Ventana de resultados de EES para el programa 1 A6

Figura A.2. Ventana de resultados de EES para el programa 2 A15

Figura A.3. Ventana de arrays de EES para el programa 2 en forma de tabla A15

Figura A.4. Ventana de resultados de EES para el programa 3 A23

Figura A.5. Ventana de arrays de EES para el programa 3 en forma de tabla A24

Figura A.6. Ventana de plots de EES para el programa 3. Puede verse la pérdida de presión por metro de tubería en función del diámetro para el caudal máximo de diseño A24

Figura B.1. Ubicación de las escuadras de unión de perfiles. Fuente: Elaboración propia A33

Figura B.2. Representación del rack en CESTRI. Fuente: Elaboración propia A36

Figura B.3. Distribución de cargas en los perfiles del nivel inferior. Fuente: Elaboración propia A37

Figura B.4. Distribución de cargas en los perfiles del nivel superior. Fuente: Elaboración propia A37

Figura B.5. Representación ampliada de la deformada del rack por el efecto de las cargas a las que se ve sometido. Fuente: Elaboración propia A38

Figura B.6. Rep. simplificada de una bomba aspirando fluido. Fuente: Elaboración propia A39

Figura B.7. Línea de bombeo, aspiración y superficie de electrolito. Fuente: Elaboración propia A40

Figura B.8. Curva de NPSHR de la bomba Finish Thompson DB6H. Fuente: [A5] A41

Lista de tablas

Tabla 1.1. Caracterización de sistemas de almacenamiento de energía según sus parámetros de operación. Fuente: Skyllas-Kazacos [8]	3
Tabla 2.1. Propiedades de los componentes de los electrolitos	12
Tabla 2.2. Parámetros electroquímicos de diseño, nomenclatura y unidades	14
Tabla 2.3. Evolución del caudal con la operación, valores significativos	17
Tabla 2.4. Magnitudes de cálculo electro-químicas: Notación, valores y unidades	17
Tabla 2.5. Dimensiones características de los distintos tipos de placa que constituyen el stack	18
Tabla 2.6. Nomenclatura y dimensiones de los colectores de los electrolitos	20
Tabla 2.7. Resumen de las propiedades del electrolito y cálculos hidráulicos de los colectores	22
Tabla 2.8. Nomenclatura y dimensiones de los rebajes de los marcos de flujo	23
Tabla 2.9. Resumen de los cálculos hidráulicos de los rebajes de los marcos de flujo . .	25
Tabla 2.10. caracterización de los electrodos, dimensiones, y nomenclatura	26
Tabla 2.11. Caracterización del flujo de electrolito en las tuberías de la instalación. Datos previos y resultados de cálculo	32
Tabla 2.12. Elementos comerciales de la instalación. Dimensiones	34
Tabla 2.13. Resumen de parámetros hidráulicos calculados para las tuberías	38
Tabla 2.14. Longitudes de tubería y pérdida de presión distribuida en la línea 1	38
Tabla 2.15. Resumen de las pérdidas de presión de la línea de electrolito 1	41
Tabla 2.16. Longitudes de tubería y pérdida de presión distribuida en la línea 2	43
Tabla 2.17. Resumen de las pérdidas de presión de la línea de electrolito 2	44
Tabla 2.18. Monitorización de la operación de la RFB. Parámetros a medir y designación	48
Tabla 3.1. Desglose de costes asociados al almacén de la batería	55
Tabla 3.2. Desglose de costes de los compuestos empleados en la elaboración del electrolito	56



Tabla 3.3. Desglose de costes asociados a la instrumentación de la batería de flujo . . .	57
Tabla 3.4. Desglose de costes asociados a la instalación externa de la batería de flujo	57
Tabla 3.5. Resumen de los costes de las partidas que componen el presupuesto del proyecto	58
Tabla 4.1. Medidas de presión diferencial del stack sin electrodo	68
Tabla 4.2. Medidas de presión diferencial del stack con electrodo.	69
Tabla B.1. Parámetros electroquímicos para el cálculo del potencial medio de celda . .	A27
Tabla B.2. Propiedades de los elementos que conforman la celda	A28
Tabla B.3. Propiedades de los componentes del electrolito	A31
Tabla B.4. Longitudes y cantidad de perfiles que conforman el rack	A33
Tabla B.5. Longitudes y cantidad de perfiles que conforman el rack	A34
Tabla B.6. Pesos de los elementos de la red de tuberías y auxiliares	A35
Tabla B.7. Propiedades estructurales de los perfiles de aluminio del rack	A36
Tabla B.8. Cálculo del NPSHA. Parámetros, valores y resultados	A41
Tabla D.1. Especies que forman los electrolitos. Identificación y hojas de especificaciones	A59

Anexos

Anexo A. Códigos en EES

En este anexo se presentan tres programas desarrollados durante el diseño y cálculo de la instalación de la batería de flujo. Los códigos se programaron en EES (*Engineering Equation Solver*), pudiéndose modificar cualquier parámetro de diseño (concentración de algún componente del electrolito, capacidad de la batería, espesor de las placas, propiedades físicas...) y volver a resolver las ecuaciones planteadas de manera instantánea, reduciendo notablemente el tiempo de cálculo necesario.

Los códigos permiten determinar el número de celdas, volumen de electrolito y caudales necesarios para alcanzar los valores de potencia y capacidad de diseño de la batería, y para calcular las pérdidas de presión que experimenta el electrolito en los distintos elementos que componen el *stack* y las líneas externas de bombeo. Se han incluido en los programas comentarios con aclaraciones (unidades, número de ecuación en la memoria, etc.) para facilitar su uso, y las expresiones del código con formato de ecuación para facilitar su lectura.

A.1. Programa 1: Cálculos para el diseño de la batería

"Parámetros de diseño de la batería"

```
W_dot=5 "Potencia eléctrica [kW] de la batería de flujo"
E = 10 "Capacidad [kW.h] de la batería"
V_cell=1,2 "Voltaje promedio [V] de cada celda del stack"
J=0,1 "Densidad de corriente [A/cm²] de la batería"
A_eff=900 "Área efectiva [cm²] de electrodo, corresponden a 30x30cm"
```

"Cálculo del número de celdas del stack"

```
I_stack=J*A_eff "Corriente [A] de la batería (ec. 2.6)"
W_dot*1000=I_stack*V_stack "De la definición de potencia eléctrica
y conocida la corriente, se obtiene la tensión (ec. 2.7)"
N=V_stack/V_cell "Número de celdas, 46'3 ~ 47 celdas (ec. 2.8)"
N_cells=47
```

"Parámetros electroquímicos"

```
F=96485 "Constante de Faraday, carga contenida en un mol de
electrones [C/mol_e]"
C_V=1,6 "Concentración de vanadio en el electrolito [mol_V/L]"
C_H2SO4=2 "Concentración de ácido sulfúrico en el electrolito
[mol_H2SO4/L]"
C_H3PO4=0,05 "Concentración de ácido fosfórico en el electrolito
[mol_H3PO4/L]"
C_e=C_V "moles de electrones intercambiados por litro de electrolito"
SOC_max=0,8 "Estado de carga máximo durante la operación"
```



SOC_min=0,2 "Estado de carga mínimo durante la operación"
SOC_range=SOC_max - SOC_min "Rango que toma el estado de carga"

"Cálculo del volumen de electrolito necesario"

Charge_dens=C_e*F*SOC_range "Densidad de carga [C/L] de la batería,
teniendo en cuenta el rango de estado de carga (ec. 2.9)"
E_dens=Charge_dens*V_cell "Densidad de energía [J/L] de la batería,
ya que $V = J/C$ (ec. 2.10)"
Vol_electrolyte=E*1000*3600/E_dens "Volumen de electrolito en
litros, a partir de la densidad de energía y la capacidad de la
batería, empleando las unidades apropiadas (ec. 2.11)"
Vol_tank=400 "Se usarán depósitos de 400L de electrolito"

"Cálculo de caudales de operación"

alpha=6 "Se denomina alpha al factor de flujo (Flow Factor), se
mantendrá constante durante la operación"

alpha=(F*C_V*(1-SOC_max)*Q_max)/(N_cells*I_stack) "El caudal máximo
de operación serán 49'32 L/min (ec. 2.12)"
Pases_Qmax=(3600*E/W_dot)/(Vol_electrolyte/Q_max) "18'27~18 veces
circula la totalidad del electrolito por el stack durante el tiempo
de trabajo"

alpha=(F*C_V*(1-SOC_min)*Q_min)/(N_cells*I_stack) "El caudal mínimo
de operación serán 12'33 L/min (ec. 2.12)"
Pases_Qmin = (3600*E/W_dot)/(Vol_electrolyte/Q_min) "4'57~5 veces
circula la totalidad del electrolito por el stack durante el tiempo
de trabajo"

alpha=(F*C_V*(1-0,5*(SOC_min+SOC_max))*Q_med)/(N_cells*I_stack)
"El caudal medio de operación serán 19'73 L/min (ec. 2.12)"
Pases_Qmed=(3600*E/W_dot)/(Vol_electrolyte/Q_med) "7'31~7 veces
circula la totalidad del electrolito por el stack durante el tiempo
de trabajo"

"Propiedades físicas de los electrolitos"

rho=1354 "Densidad del electrolito, en kg/m³"
mu=0,004928 "Viscosidad dinámica del electrolito, en kg/m.s (Pa.s)"

$\dot{W} = 5$ Potencia eléctrica [kW] de la batería de flujo
 $E = 10$ Capacidad [kW.h] de la batería
 $V_{cell} = 1,2$ Voltaje promedio [V] de cada celda del stack
 $J = 0,1$ Densidad de corriente [A/cm²] de la batería
 $A_{eff} = 900$ Área efectiva [cm²] de electrodo, corresponden a 30x30cm



$$I_{\text{stack}} = J \cdot A_{\text{eff}} \quad \text{Corriente [A] de la batería}$$

$$\dot{W} \cdot 1000 = I_{\text{stack}} \cdot V_{\text{stack}} \quad \text{De la definición de potencia eléctrica y conocida la corriente, se obtiene la tensión}$$

$$N = \frac{V_{\text{stack}}}{V_{\text{cell}}} \quad \text{Número de celdas, } 46'3 \sim 47 \text{ celdas}$$

$$N_{\text{cells}} = 47$$

$$F = 96485 \quad \text{Constante de Faraday, carga contenida en un mol de electrones [C/mol_e]}$$

$$C_V = 1,6 \quad \text{Concentración de vanadio en el electrolito [mol_V/L]}$$

$$C_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 2 \quad \text{Concentración de ácido sulfúrico en el electrolito [mol_H}_2\text{SO}_4\text{/L]}$$

$$C_{\text{H}_3\text{PO}_4} = 0,05 \quad \text{Concentración de ácido fosfórico en el electrolito [mol_H}_3\text{PO}_4\text{/L]}$$

$$C_e = C_V \quad \text{moles de electrones intercambiados por litro de electrolito}$$

$$\text{SOC}_{\text{max}} = 0,8 \quad \text{Estado de carga máximo durante la operación}$$

$$\text{SOC}_{\text{min}} = 0,2 \quad \text{Estado de carga mínimo durante la operación}$$

$$\text{SOC}_{\text{range}} = \text{SOC}_{\text{max}} - \text{SOC}_{\text{min}} \quad \text{Rango que toma el estado de carga}$$

$$\text{Charge}_{\text{dens}} = C_e \cdot F \cdot \text{SOC}_{\text{range}} \quad \text{Densidad de carga [C/L] de la batería, teniendo en cuenta el rango de estado de carga}$$

$$E_{\text{dens}} = \text{Charge}_{\text{dens}} \cdot V_{\text{cell}} \quad \text{Densidad de energía [J/L] de la batería, ya que } V = J/C$$

$$\text{Vol}_{\text{electrolyte}} = E \cdot 1000 \cdot \frac{3600}{E_{\text{dens}}} \quad \text{Volumen de electrolito en litros, a partir de la densidad de energía y la capacidad de la batería, empleando las unidades apropiadas}$$

$$\text{Vol}_{\text{tank}} = 400 \quad \text{Se usarán depósitos de 400L de electrolito}$$

$$\alpha = 6 \quad \text{Se denomina alpha al factor de flujo (Flow Factor), se mantendrá constante durante la operación}$$

$$\alpha = \frac{F \cdot C_V \cdot (1 - \text{SOC}_{\text{max}}) \cdot Q_{\text{max}}}{N_{\text{cells}} \cdot I_{\text{stack}}} \quad \text{El caudal máximo de operación serán } 49'32 \text{ L/min}$$

$$\text{Pases}_{Q_{\text{max}}} = \frac{3600 \cdot \frac{E}{W}}{\frac{\text{Vol}_{\text{electrolyte}}}{Q_{\text{max}}}} \quad 18'27 \sim 18 \text{ veces circula la totalidad del electrolito por el stack}$$

durante el tiempo de trabajo

$$\alpha = \frac{F \cdot C_V \cdot (1 - \text{SOC}_{\text{min}}) \cdot Q_{\text{min}}}{N_{\text{cells}} \cdot I_{\text{stack}}} \quad \text{El caudal mínimo de operación serán } 12'33 \text{ L/min}$$

$$\text{Pases}_{Q_{\text{min}}} = \frac{3600 \cdot \frac{E}{W}}{\frac{\text{Vol}_{\text{electrolyte}}}{Q_{\text{min}}}} \quad 4'57 \sim 5 \text{ veces circula la totalidad del electrolito por el stack}$$

durante el tiempo de trabajo



$$\alpha = \frac{F \cdot C_V \cdot (1 - 0,5 \cdot (SOC_{\min} + SOC_{\max})) \cdot Q_{\text{med}}}{N_{\text{cells}} \cdot I_{\text{stack}}}$$

El caudal medio de

operación serán 1973 L/min

$$\text{Pases}_{Q_{\text{med}}} = \frac{3600 \cdot \frac{E}{W}}{\frac{Vol_{\text{electrolyte}}}{Q_{\text{med}}}}$$

7'31~7 veces circula la totalidad del electrolito por el stack

durante el tiempo de trabajo

$$\rho = 1354 \quad \text{Densidad del electrolito, en kg/m}^3$$

$$\mu = 0,004928 \quad \text{Viscosidad dinámica del electrolito, en kg/m.s (Pa.s)}$$

$\alpha = 6$ [-]	$A_{\text{eff}} = 900$ [cm ²]	$\text{Charge}_{\text{dens}} = 92626$ [C/L]
$C_e = 1,6$ [mol _e /L]	$C_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 2$ [mol _{H₂SO₄} /L]	$C_{\text{H}_3\text{PO}_4} = 0,05$ [mol _{H₃PO₄} /L]
$C_V = 1,6$ [mol _V /L]	$E = 10$ [kW.h]	$E_{\text{dens}} = 111151$ [J/L]
$F = 96485$ [C/mol _e]	$I_{\text{stack}} = 90$ [A]	$J = 0,1$ [A/cm ²]
$\mu = 0,004928$ [kg/m.s]	$N = 46,3$ [-]	$N_{\text{cells}} = 47$ [-]
$\text{Pases}_{Q_{\text{max}}} = 18,27$ [-]	$\text{Pases}_{Q_{\text{med}}} = 7,309$ [-]	$\text{Pases}_{Q_{\text{min}}} = 4,568$ [-]
$Q_{\text{max}} = 0,822$ [L/s]	$Q_{\text{med}} = 0,3288$ [L/s]	$Q_{\text{min}} = 0,2055$ [L/s]
$\rho = 1354$ [kg/m ³]	$SOC_{\text{max}} = 0,8$ [-]	$SOC_{\text{min}} = 0,2$ [-]
$SOC_{\text{range}} = 0,6$	$Vol_{\text{electrolyte}} = 323,9$ [L]	$Vol_{\text{tank}} = 400$ [L]
$V_{\text{cell}} = 1,2$ [V]	$V_{\text{stack}} = 55,56$ [V]	$\dot{W} = 5$ [kW]

Figura A.1. Ventana de resultados de EES para el programa 1.

A.2. Programa 2: Cálculo de pérdidas de presión en el stack

"Datos previos"

```

g=9,81 "Aceleración de la gravedad, en m/s^2"
rho=1354 "Densidad del electrolito, en kg/m3"
mu=0,004928 "Viscosidad dinámica del electrolito, en Pa.s (Kg/m.s)"
F=96485 "Constante de Faraday, expresa la carga eléctrica contenida
en un mol de electrones"
SOC_max=0,8 "Estado de carga máximo al que va a operar la batería"
SOC_min=0,2 "Estado de carga mínimo al que va a operar la batería"
alpha=6 "Factor de flujo (flow factor), se mantiene constante aunque
varíe el estado de carga"
C_e=1,6 "moles de electrones intercambiados por L de electrolito"
C_V=1,6 "Concentración de vanadio en el electrolito, en mol/L"
N_cells=47 "Número de celdas de la batería"
I_stack=90 "Corriente de la batería, en A"
V_cell=1,2 "Voltaje de una celda, se considera 1'2V"
A_eff=900 "Área efectiva del electrodo, en cm^2"

```



"Cálculos introductorios"

```
Vol_electrolyte=10*1000*3600/(V_cell*C_e*F*(SOC_max-SOC_min))  
"Volumen necesario de electrolito, en L (ec. 2.11)"  
alpha=((Q_max/60)*F*C_V*(1-SOC_max))/(N_cells*I_stack) "Caudal  
máximo de electrolito, en L/min (ec. 2.12)"  
alpha=((Q_min/60)*F*C_V*(1-SOC_min))/(N_cells*I_stack) "Caudal  
mínimo de electrolito, en L/min (ec. 2.12)"  
alpha=((Q_med/60)*F*C_V*(1-0,5*(SOC_max+SOC_min)))/(N_cells*I_stack)  
"Caudal medio de electrolito, en L/min (ec. 2.12)"  
Q_cell=Q_max/N_cells "Caudal que fluye por cada celda en L/min (Total  
entre número de celdas) (ec. 2.24)"
```

"Geometría de las placas"

```
H_bpp=40 "Alto de las placas bipolares, en cm"  
W_bpp=40 "Ancho de las placas bipolares, en cm"  
Th_bpp=0,5 "Espesor de las placas bipolares, en cm"  
  
H_press=40 "Alto de las placas de presión, en cm"  
W_press=40 "Ancho de las placas de presión, en cm"  
Th_press=0,3 "Espesor de las placas de presión, en cm"  
  
H_curr=40 "Alto de las placas colectoras de corriente, en cm"  
W_curr=40 "Ancho de las placas colectoras de corriente, en cm"  
Th_curr=0,1 "Espesor de las placas colectoras de corriente, en cm"  
  
H_ter=50 "Alto de las placas terminales, en cm"  
W_ter=50 "Ancho de las placas terminales, en cm"  
Th_ter=2 "Espesor de las placas terminales, en cm"  
  
Th_frame=0,3 "Espesor de los marcos, en cm"  
  
H_stack=H_ter "Altura del stack, en cm"  
W_stack=W_ter "Ancho del stack, en cm"  
Stack_in_length=Th_bpp*(N_cells+1)+2*Th_press+2*Th_curr+2*N_cells*Th_frame  
"Longitud interna del stack, en cm (ec. 2.14)"  
Stack_ext_length=Stack_in_length+2*Th_ter "Longitud externa del  
stack, en cm. Es la interna sumando los espesores de las dos placas  
terminales (ec. 2.15)"
```

"Geometría de los colectores"

```
L_manifold=Stack_in_length "La longitud de los colectores es la  
longitud interna del stack, en cm"  
W_manifold=30 "Anchura de los colectores, en cm"  
H_manifold=1 "Altura de los colectores, en cm"  
A_manifold=100*W_manifold*H_manifold "Sección transversal del  
colector, en mm^2"  
D_hid_manifold=4*A_manifold/(2*10*(W_manifold+H_manifold)) "Diámetro  
hidráulico del colector, en mm (ec. 2.17)"  
Vol_manifold=(A_manifold*10*L_manifold)/1000000 "Volumen del  
colector, en litros"
```



$\tau_{\text{llenado}} = 60 \cdot \text{Vol_manifold} / Q_{\text{max}}$ "Tiempo de llenado del colector, en s
(ec. 2.16)"

"Geometría de los rebajes"

$L_{\text{reb}} = 20$ "Longitud en mm de los rebajes (alimentación y salida de electrolito) en mm"
 $W_{\text{reb}} = 300$ "Ancho de los rebajes en mm"
 $Th_{\text{reb}} = 1,25$ "Profundidad (espesor) de los rebajes en mm"
 $D_{\text{hid_reb}} = (4 \cdot A_{\text{reb}}) / (2 \cdot (W_{\text{reb}} + Th_{\text{reb}}))$ "Diámetro hidráulico de los rebajes en mm. Por definición, $D_{\text{Hid}} = 4A / \text{Perímetro}$ (ec. 2.22)"
 $A_{\text{reb}} = W_{\text{reb}} \cdot Th_{\text{reb}}$ "Sección transversal de los rebajes, en mm^2 "
 $\theta = A_{\text{reb}} / A_{\text{manifold}}$ "Relación entre la sección transversal de rebajes y colector. Condición, debe ser menor que 0,4 (experiencias previas con pilas de combustible en el LIFTEC) (ec. 2.23)."
 $K_{\text{in}} = 0,5$ "Constante de pérdidas localizadas para la entrada a rebajes"
 $K_{\text{out}} = 1$ "Constante de pérdidas localizadas para la salida a rebajes"

"Caracterización de los electrodos"

$\text{Por}_{\text{el}} = 0,9$ "Porosidad del electrodo, entendida como la relación entre el volumen de huecos (poros) y el volumen del electrodo"
 $\text{Perm}_{\text{el}} = 0,0000000021$ "Permeabilidad del electrodo, en m^2 "
 $K_{\text{el}} = 4,28$ "Constante de Kozeny-Carman del electrodo"
 $D_{\text{por}} = 0,6$ "Diámetro medio de los poros del electrodo, en mm"
 $D_{\text{fib}} = 0,0176$ "Diámetro medio de las fibras que componen el electrodo, en mm"
 $H_{\text{el}} = 300$ "Altura del electrodo, en mm"
 $W_{\text{el}} = 300$ "Ancho del electrodo, en mm"
 $Th_{\text{el}} = 10 \cdot Th_{\text{frame}}$ "Espesor del electrodo, en mm (El espesor original eran 4'6mm, quedando en el espesor del marco al comprimirse)"
 $A_{\text{flow_el}} = \text{Por}_{\text{el}} \cdot Th_{\text{el}} \cdot W_{\text{el}}$ "Área que tiene el fluido a través del electrodo en mm^2 , producto del área del electrodo por su porosidad"
 $\text{Vel}_{\text{sup_el}} = (Q_{\text{cell}} / (60 \cdot 1000)) / (Th_{\text{el}} \cdot W_{\text{el}} / 1000000)$ "Velocidad superficial del electrolito a través del electrodo, caudal entre área de flujo, expresado en m/s"
 $\text{Vel}_{\text{int_el}} = \text{Vel}_{\text{sup_el}} / \text{Por}_{\text{el}}$ "Velocidad intersticial del electrolito a través del electrodo, en m/s"

"Cálculo de pérdidas de presión"

"Colectores (índice 1)"

$\text{Vel}[1] = (Q_{\text{max}} / (1000 \cdot 60)) / (A_{\text{manifold}} / 1000000)$ "Velocidad del electrolito a su paso por los colectores, en m/s (ec. 2.19)"
 $\text{Re}[1] = \rho \cdot \text{Vel}[1] \cdot (D_{\text{hid_manifold}} / 1000) / \mu$ "Número de Reynolds del electrolito en colectores (ec. 2.18)"
 $f_{\text{lam}}[1] = (58,91 + 50,66 \cdot \exp(-3,4 / (W_{\text{manifold}} / H_{\text{manifold}}))) / \text{Re}[1]$
"Calcula el factor de fricción, válido si $\text{Re} < 2000$ (ec. 2.20)"



```
f_trans[1]=(56/2000)+((Re[1]-2000)/2000)*((-56/2000)+1/((-1,8*ln(6,9/Re[1]))/(ln(10)))^2)) "Calcula el factor de fricción, válido si 2000<Re<4000"
f_turb[1]=1/((-1,8*ln(6,9/Re[1]))/(ln(10)))^2) "Calcula el factor de fricción, válido si Re>4000"
f[1]=f_lam[1] "En este caso, el factor de fricción es laminar, pues Re < 2000"
DELTA_P[1]=2*f[1]*(L_manifold/D_hid_manifold)*0,5*rho*((Vel[1])^2)
"Pérdida de presión en colectores del electrolito, en Pa (Teniendo en cuenta que hay dos colectores para cada circuito, uno en entrada y otro en salida) (ec. 2.21)"
DELTA_P_colectores=DELTA_P[1] "Pérdida de presión de los dos colectores, en Pa"
```

"Rebajes (índice 2)"

```
Vel[2]=(Q_cell/(1000*60))/(A_reb/1000000) "Velocidad del electrolito a su paso por los conductos y rebajes, en m/s"
Re[2]=rho*Vel[2]*(D_hid_reb/1000)/mu "Número de Reynolds del electrolito en conductos y rebajes, usando el diámetro hidráulico"
f_lam[2]=(58,91+50,66*exp(-3,4/(W_reb/Th_reb)))/Re[2] "Calcula el factor de fricción, válido si Re<2000 (ec. 2.25)"
f_trans[2]=(56/2000)+((Re[2]-2000)/2000)*((-56/2000)+1/((-1,8*ln(6,9/Re[2]))/(ln(10)))^2) "Calcula el factor de fricción, válido si 2000<Re<4000. Si el Reynolds no está en el rango de aplicación de la correlación, proporciona un factor de fricción negativo."
f_turb[2]=1/((-1,8*ln(6,9/Re[2]))/(ln(10)))^2) "Calcula el factor de fricción, válido si Re>4000"
f[2]=f_lam[2] "En este caso, el factor de fricción es laminar, pues Re < 2000"
DELTA_P[2]=2*(f[2]*(L_reb/D_hid_reb)+K_in+K_out)*0,5*rho*(Vel[2])^2
"Pérdida de presión en los rebajes de los conductos, en Pa (Teniendo en cuenta que hay dos rebajes, uno para alimentación y otro para salida de electrolito. Se añaden las pérdidas localizadas de entrada y salida al colector) (ec. 2.27)"
DELTA_P_placas=DELTA_P[2] "Pérdida de presión en las placas en Pa, correspondiente a las contribuciones de los rebajes de alimentación y salida de electrolito"
```

"Electrodos"

```
DELTA_P_electrodos=(mu*(Q_cell/60000)*(H_el/1000))/((((D_fib/1000)^2)/(16*K_el))*(((Por_el)^3)/((1-Por_el)^2))*((Th_el/1000)*(W_el/1000)))
"Mediante la expresión de König y otros (Journal of Power Sources), calcula la pérdida de presión en los electrodos en Pa (ec. 2.28)"
```

"Totales en el stack"

```
DELTA_P_stack=DELTA_P_colectores+DELTA_P_placas+DELTA_P_electrodos
"Perdida de presión total en el stack, en Pa (ec. 2.29)"
DELTA_H_stack=DELTA_P_stack/(g*1000) "Pérdida de presión del stack, expresada en metros de columna de agua (mca)"
```



$\gamma = 100 \cdot \Delta P_{\text{electrodos}} / \Delta P_{\text{stack}}$ "Expresa el porcentaje de pérdida de presión del stack que tiene lugar en los electrodos"

$\beta = (\Delta P_{\text{electrodos}} + \Delta P_{\text{placas}}) / \Delta P_{\text{colectores}}$
"Cociente entre la pérdida de presión en electrodo más rebajes y la pérdida en colectores. Según Barbir debe ser mayor que 10. Expresa la condición de diseño de que el colector esté lleno de electrolito antes de que empiece a fluir hacia los electrodos (ec. 2.30)"

$g = 9,81$ Aceleración de la gravedad, en m/s^2

$\rho = 1354$ Densidad del electrolito, en kg/m^3

$\mu = 0,004928$ Viscosidad dinámica del electrolito, en Pa.s (Kg/m.s)

$F = 96485$ Constante de Faraday, expresa la carga eléctrica contenida en un mol de electrones

$\text{SOC}_{\text{max}} = 0,8$ Estado de carga máximo al que va a operar la batería

$\text{SOC}_{\text{min}} = 0,2$ Estado de carga mínimo al que va a operar la batería

$\alpha = 6$ Factor de flujo (flow factor), se mantiene constante aunque varíe el estado de carga

$C_e = 1,6$ moles de electrones intercambiados por L de electrolito

$C_V = 1,6$ Concentración de vanadio en el electrolito, en mol/L

$N_{\text{cells}} = 47$ Número de celdas de la batería

$I_{\text{stack}} = 90$ Corriente de la batería, en A

$V_{\text{cell}} = 1,2$ Voltaje de una celda, se considera 1'2V

$A_{\text{eff}} = 900$ Área efectiva del electrodo, en cm^2

$$\text{Vol}_{\text{electrolyte}} = 10 \cdot 1000 \cdot \frac{3600}{V_{\text{cell}} \cdot C_e \cdot F \cdot (\text{SOC}_{\text{max}} - \text{SOC}_{\text{min}})}$$
 Volumen necesario de electrolito, en L

$$\alpha = \frac{\frac{Q_{\text{max}}}{60} \cdot F \cdot C_V \cdot (1 - \text{SOC}_{\text{max}})}{N_{\text{cells}} \cdot I_{\text{stack}}}$$
 Caudal máximo de electrolito, en L/min

$$\alpha = \frac{\frac{Q_{\text{min}}}{60} \cdot F \cdot C_V \cdot (1 - \text{SOC}_{\text{min}})}{N_{\text{cells}} \cdot I_{\text{stack}}}$$
 Caudal mínimo de electrolito, en L/min

$$\alpha = \frac{\frac{Q_{\text{med}}}{60} \cdot F \cdot C_V \cdot (1 - 0,5 \cdot (\text{SOC}_{\text{max}} + \text{SOC}_{\text{min}}))}{N_{\text{cells}} \cdot I_{\text{stack}}}$$
 Caudal medio de electrolito, en L/min



$$Q_{\text{cell}} = \frac{Q_{\text{max}}}{N_{\text{cells}}} \quad \text{Caudal que fluye por cada celda en L/min (Total entre número de celdas)}$$

$$H_{\text{bpp}} = 40 \quad \text{Alto de las placas bipolares, en cm}$$

$$W_{\text{bpp}} = 40 \quad \text{Ancho de las placas bipolares, en cm}$$

$$Th_{\text{bpp}} = 0,5 \quad \text{Espesor de las placas bipolares, en cm}$$

$$H_{\text{press}} = 40 \quad \text{Alto de las placas de presión, en cm}$$

$$W_{\text{press}} = 40 \quad \text{Ancho de las placas de presión, en cm}$$

$$Th_{\text{press}} = 0,3 \quad \text{Espesor de las placas de presión, en cm}$$

$$H_{\text{curr}} = 40 \quad \text{Alto de las placas colectoras de corriente, en cm}$$

$$W_{\text{curr}} = 40 \quad \text{Ancho de las placas colectoras de corriente, en cm}$$

$$Th_{\text{curr}} = 0,1 \quad \text{Espesor de las placas colectoras de corriente, en cm}$$

$$H_{\text{ter}} = 50 \quad \text{Alto de las placas terminales, en cm}$$

$$W_{\text{ter}} = 50 \quad \text{Ancho de las placas terminales, en cm}$$

$$Th_{\text{ter}} = 2 \quad \text{Espesor de las placas terminales, en cm}$$

$$Th_{\text{frame}} = 0,3 \quad \text{Espesor de los marcos, en cm}$$

$$H_{\text{stack}} = H_{\text{ter}} \quad \text{Altura del stack, en cm}$$

$$W_{\text{stack}} = W_{\text{ter}} \quad \text{Ancho del stack, en cm}$$

$$\text{Stack}_{\text{in,length}} = Th_{\text{bpp}} \cdot (N_{\text{cells}} + 1) + 2 \cdot Th_{\text{press}} + 2 \cdot Th_{\text{curr}} + 2 \cdot N_{\text{cells}} \cdot Th_{\text{frame}}$$

Longitud interna del stack, en cm

$$\text{Stack}_{\text{ext,length}} = \text{Stack}_{\text{in,length}} + 2 \cdot Th_{\text{ter}} \quad \text{Longitud externa del stack, en cm. Es la interna sumando los espesores de las dos placas terminales}$$

$$L_{\text{manifold}} = \text{Stack}_{\text{in,length}} \quad \text{La longitud de los colectores es la longitud interna del stack, en cm}$$

$$W_{\text{manifold}} = 30 \quad \text{Anchura de los colectores, en cm}$$

$$H_{\text{manifold}} = 1 \quad \text{Altura de los colectores, en cm}$$

$$A_{\text{manifold}} = 100 \cdot W_{\text{manifold}} \cdot H_{\text{manifold}} \quad \text{Sección transversal del colector, en mm}^2$$

$$D_{\text{hid,manifold}} = 4 \cdot \frac{A_{\text{manifold}}}{2 \cdot 10 \cdot (W_{\text{manifold}} + H_{\text{manifold}})} \quad \text{Diámetro hidráulico del colector, en mm}$$

$$\text{Vol}_{\text{manifold}} = \frac{A_{\text{manifold}} \cdot 10 \cdot L_{\text{manifold}}}{1000000} \quad \text{Volumen del colector, en litros}$$

$$t_{\text{llenado}} = 60 \cdot \frac{\text{Vol}_{\text{manifold}}}{Q_{\text{max}}} \quad \text{Tiempo de llenado del colector, en s}$$



$L_{reb} = 20$ Longitud en mm de los rebajes (alimentación y salida de electrolito) en mm

$W_{reb} = 300$ Ancho de los rebajes en mm

$Th_{reb} = 1,25$ Profundidad (espesor) de los rebajes en mm

$D_{hid,reb} = \frac{4 \cdot A_{reb}}{2 \cdot (W_{reb} + Th_{reb})}$ Diámetro hidráulico de los rebajes en mm. Por definición,
D.Hid = 4A/Perímetro

$A_{reb} = W_{reb} \cdot Th_{reb}$ Sección transversal de los rebajes, en mm²

$\theta = \frac{A_{reb}}{A_{manifold}}$ Relación entre la sección transversal de rebajes y colector. Condición, debe ser menor que 0,4 (experiencias previas con pilas de combustible en el LIFTEC)

$K_{in} = 0,5$ Constante de pérdidas localizadas para la entrada a rebajes

$K_{out} = 1$ Constante de pérdidas localizadas para la salida a rebajes

$Por_{el} = 0,9$ Porosidad del electrodo, entendida como la relación entre el volumen de huecos (poros) y el volumen del electrodo

$Perm_{el} = 2,1 \times 10^{-10}$ Permeabilidad del electrodo, en m²

$K_{el} = 4,28$ Constante de Kozeny-Carman del electrodo

$D_{por} = 0,6$ Diámetro medio de los poros del electrodo, en mm

$D_{fib} = 0,0176$ Diámetro medio de las fibras que componen el electrodo, en mm

$H_{el} = 300$ Altura del electrodo, en mm

$W_{el} = 300$ Ancho del electrodo, en mm

$Th_{el} = 10 \cdot Th_{frame}$ Espesor del electrodo, en mm (El espesor original eran 4'6mm, quedando en el espesor del marco al comprimirse)

$A_{flow,el} = Por_{el} \cdot Th_{el} \cdot W_{el}$ Área que tiene el fluido a través del electrodo en mm², producto del área del electrodo por su porosidad

$Vel_{sup,el} = \frac{\frac{Q_{cell}}{60 \cdot 1000}}{Th_{el} \cdot \frac{W_{el}}{1000000}}$ Velocidad superficial del electrolito a través del electrodo, caudal entre área de flujo, expresado en m/s

$Vel_{int,el} = \frac{Vel_{sup,el}}{Por_{el}}$ Velocidad intersticial del electrolito a través del electrodo, en m/s

$$Vel_1 = \frac{\frac{Q_{max}}{1000 \cdot 60}}{\frac{A_{manifold}}{1000000}}$$

Velocidad del electrolito a su paso por los colectores, en m/s

$$Re_1 = \rho \cdot Vel_1 \cdot \frac{D_{hid,manifold}}{1000 \cdot \mu}$$

Número de Reynolds del electrolito en colectores

$$f_{lam;1} = \frac{58,91 + 50,66 \cdot \exp\left[\frac{-3,4}{\frac{W_{manifold}}{H_{manifold}}}\right]}{Re_1}$$

Calcula el factor de fricción, válido si $Re < 2000$

$$f_{trans;1} = \frac{56}{2000} + \left[\frac{Re_1 - 2000}{2000}\right] \cdot \left[\frac{-56}{2000} + \frac{1}{\left(\frac{-1,8 \cdot \ln\left[\frac{6,9}{Re_1}\right]}{\ln(10)}\right)^2}\right]$$

factor de fricción, válido si $2000 < Re < 4000$

Calcula el

$$f_{turb;1} = \frac{1}{\left[\frac{-1,8 \cdot \ln\left[\frac{6,9}{Re_1}\right]}{\ln(10)}\right]^2}$$

Calcula el factor de fricción, válido si $Re > 4000$

$$f_1 = f_{lam;1}$$

En este caso, el factor de fricción es laminar, pues $Re < 2000$

$$\Delta p_{;1} = 2 \cdot f_1 \cdot \frac{L_{manifold}}{D_{hid,manifold}} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot Vel_1^2$$

Pérdida de presión en colectores del electrolito, en Pa (Teniendo en cuenta que hay dos colectores para cada circuito, uno en entrada y otro en salida)

$$\Delta p_{;colectores} = \Delta p_{;1}$$

Pérdida de presión de los dos colectores, en Pa

$$Vel_2 = \frac{\frac{Q_{cell}}{1000 \cdot 60}}{\frac{A_{reb}}{1000000}}$$

Velocidad del electrolito a su paso por los conductos y rebajes, en m/s

$$Re_2 = \rho \cdot Vel_2 \cdot \frac{D_{hid,reb}}{1000 \cdot \mu}$$

Número de Reynolds del electrolito en conductos y rebajes, usando el diámetro hidráulico

$$f_{lam;2} = \frac{58,91 + 50,66 \cdot \exp\left[\frac{-3,4}{\frac{W_{reb}}{Th_{reb}}}\right]}{Re_2}$$

Calcula el factor de fricción, válido si $Re < 2000$

$$f_{trans;2} = \frac{56}{2000} + \left[\frac{Re_2 - 2000}{2000} \right] \cdot \left[\frac{-56}{2000} + \frac{1}{\left(\frac{-1,8 \cdot \ln \left[\frac{6,9}{Re_2} \right]}{\ln(10)} \right)^2} \right]$$

Calcula el factor de fricción, válido si $2000 < Re < 4000$. Si el Reynolds no está en el rango de aplicación de la correlación, proporciona un factor de fricción negativo

$$f_{turb;2} = \frac{1}{\left[\frac{-1,8 \cdot \ln \left(\frac{6,9}{Re_2} \right)}{\ln(10)} \right]^2}$$

Calcula el factor de fricción, válido si $Re > 4000$

$$f_2 = f_{lam;2}$$

En este caso, el factor de fricción es laminar, pues $Re < 2000$

$$\Delta P_{;2} = 2 \cdot \left[f_2 \cdot \frac{L_{reb}}{D_{hid;reb}} + K_{in} + K_{out} \right] \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot Vel_2^2$$

Pérdida de presión en los rebajes de los conductos, en Pa (Teniendo en cuenta que hay dos rebajes, uno para alimentación y otro para salida de electrolito. Se añaden las pérdidas localizadas de entrada y salida al colector)

$$\Delta P_{;placas} = \Delta P_{;2}$$

Pérdida de presión en las placas en Pa, correspondiente a las contribuciones de los rebajes de alimentación y salida de electrolito

$$\Delta P_{;electrodos} = \frac{\mu \cdot \frac{Q_{cell}}{60000} \cdot \frac{H_{el}}{1000}}{\left[\frac{D_{fib}}{1000} \right]^2 \cdot \frac{Por_{el}^3}{(1 - Por_{el})^2} \cdot \frac{Th_{el}}{1000} \cdot \frac{W_{el}}{1000}}$$

Mediante la expresión de König y otros (Journal of Power Sources), calcula la pérdida de presión en los electrodos en Pa

$$\Delta P_{;stack} = \Delta P_{;colectores} + \Delta P_{;placas} + \Delta P_{;electrodos}$$

Pérdida de presión total en el stack, en Pa

$$\Delta H_{;stack} = \frac{\Delta P_{;stack}}{g \cdot 1000}$$

Pérdida de presión del stack, expresada en metros de columna de agua (mca)

$$\gamma = 100 \cdot \frac{\Delta P_{;electrodos}}{\Delta P_{;stack}}$$

Expresa el porcentaje de pérdida de presión del stack que tiene lugar en los electrodos

$$\beta = \frac{\Delta P_{;electrodos} + \Delta P_{;placas}}{\Delta P_{;colectores}}$$

Cociente entre la pérdida de presión en electrodo más rebajes y la pérdida en colectores. Según Barbir debe ser mayor que 10. Expresa la condición de diseño de que el colector esté lleno de electrolito antes de que empiece a fluir hacia los electrodos

$\square = 6$ [-]	$A_{\text{eff}} = 900$ [cm ²]	$A_{\text{flow,el}} = 810$ [mm ²]
$A_{\text{manifold}} = 3000$ [mm ²]	$A_{\text{reb}} = 375$ [mm ²]	$\square = 4383$ [-]
$C_e = 1,6$ [mol _e /L]	$C_V = 1,6$ [mol _v /L]	$\square_{H,\text{stack}} = 8,892$ [mca]
$\square_{P,\text{colectores}} = 19,9$ [Pa]	$\square_{P,\text{electrodos}} = 87125$ [Pa]	$\square_{P,\text{placas}} = 85,15$ [Pa]
$\square_{P,\text{stack}} = 87230$ [Pa]	$D_{\text{fib}} = 0,0176$ [mm]	$D_{\text{hid,manifold}} = 19,35$ [mm]
$D_{\text{hid,reb}} = 2,49$ [mm]	$D_{\text{por}} = 0,6$ [mm]	$F = 96485$ [C/mol _e]
$g = 9,81$ [m/s ²]	$\square = 99,880$ [-]	$H_{\text{bpp}} = 40$ [cm]
$H_{\text{curr}} = 40$ [cm]	$H_{\text{el}} = 300$ [mm]	$H_{\text{manifold}} = 1$ [cm]
$H_{\text{press}} = 40$ [cm]	$H_{\text{stack}} = 50$ [cm]	$H_{\text{ter}} = 50$ [cm]
$I_{\text{stack}} = 90$ [A]	$K_{\text{el}} = 4,28$ [-]	$K_{\text{in}} = 0,5$ [-]
$K_{\text{out}} = 1$ [-]	$L_{\text{manifold}} = 53$ [cm]	$L_{\text{reb}} = 20$ [mm]
$\square = 0,004928$ [Pa.s]	$N_{\text{cells}} = 47$ [-]	$\text{Perm}_{\text{el}} = 2,100\text{E-}10$ [m ²]
$\text{Por}_{\text{el}} = 0,9$ [-]	$Q_{\text{cell}} = 1,049$ [L/min]	$Q_{\text{max}} = 49,32$ [L/min]
$Q_{\text{med}} = 19,73$ [L/min]	$Q_{\text{min}} = 12,33$ [L/min]	$\square = 1354$ [kg/m ³]
$\text{SOC}_{\text{max}} = 0,8$ [-]	$\text{SOC}_{\text{min}} = 0,2$ [-]	$\text{Stack}_{\text{ext,length}} = 57$ [cm]
$\text{Stack}_{\text{in,length}} = 53$ [cm]	$\square_{\text{llenado}} = 1,934$ [s]	$\square = 0,125$ [-]
$\text{Th}_{\text{bpp}} = 0,5$ [cm]	$\text{Th}_{\text{curr}} = 0,1$ [cm]	$\text{Th}_{\text{el}} = 3$ [mm]
$\text{Th}_{\text{frame}} = 0,3$ [cm]	$\text{Th}_{\text{press}} = 0,3$ [cm]	$\text{Th}_{\text{reb}} = 1,25$ [mm]
$\text{Th}_{\text{ter}} = 2$ [cm]	$\text{Vel}_{\text{int,el}} = 0,02159$ [m/s]	$\text{Vel}_{\text{sup,el}} = 0,01943$ [m/s]
$\text{Vol}_{\text{electrolyte}} = 323,9$ [L]	$\text{Vol}_{\text{manifold}} = 1,59$ [L]	$V_{\text{cell}} = 1,2$ [V]
$W_{\text{bpp}} = 40$ [cm]	$W_{\text{curr}} = 40$ [cm]	$W_{\text{el}} = 300$ [mm]
$W_{\text{manifold}} = 30$ [cm]	$W_{\text{press}} = 40$ [cm]	$W_{\text{reb}} = 300$ [mm]
$W_{\text{stack}} = 50$ [cm]	$W_{\text{ter}} = 50$ [cm]	

Figura A.2 Ventana de resultados de EES para el programa 2.

	1	2	3	4	5	6	7	8
Sort	Vel_i [m/s]	Re_i [-]	$f_{\text{lam},i}$ [-]	$f_{\text{trans},i}$ [-]	$f_{\text{turb},i}$ [-]	f_i [-]	$\Delta p_{p,i}$ [Pa]	
[1]	0,274	1457	0,07147	0,0201	0,05711	0,07147	19,9	
[2]	0,04664	31,9	3,412	-0,6313	0,698	3,412	85,15	

Figura A.3. Ventana de arrays de EES para el programa 2 en forma de tabla.



A.3. Programa 3: Cálculo de pérdidas de presión en la instalación externa

"Datos iniciales"

```
g=9,81 "Aceleración de la gravedad, en m/s^2"
rho=1354 "Densidad del electrolito, en kg/m3"
mu=0,004928 "Viscosidad dinámica del electrolito, en Pa.s (Kg/m.s)"
epsilon=0,0000015 "Rugosidad media del material de las tuberías, en metros"
F=96485 "Constante de Faraday, expresa la carga eléctrica contenida en un mol de electrones"
SOC_max=0,8 "Estado de carga máximo al que va a operar la batería"
SOC_min=0,2 "Estado de carga mínimo al que va a operar la batería"
alpha=6 "Factor de flujo (flow factor), se mantiene constante aunque varíe el estado de carga"
C_V=1,6 "Concentración de vanadio en el electrolito, en mol/L"
C_e=C_V "Número de moles de electrones intercambiados por litro de electrolito, en mol/L"
C_H2SO4=2 "Concentración de ácido sulfúrico en el electrolito, en mol/L"
C_H3PO4=0,05 "Concentración de ácido fosfórico en el electrolito, en mol/L"
N_cells=47 "Número de celdas de la batería"
J=0,1 "Densidad de corriente de trabajo, en A/cm^2"
A_cell=900 "Área efectiva de electrodo, en cm^2"
V_cell=1,2 "Voltaje de una celda del stack, se considera 1'2V"
```

"Cálculos previos"

```
I_stack=A_cell*J "Corriente de la batería, en A (ec. 2.6)"
Vol_electrolyte=10*1000*3600/(V_cell*C_e*F*(SOC_max-SOC_min))
"Volumen necesario de electrolito, en L (ec. 2.11)"

alpha=((Q_max/60)*F*C_V*(1-SOC_max))/(N_cells*I_stack) "Caudal máximo de electrolito, en L/min (ec. 2.12)"
alpha=((Q_min/60)*F*C_V*(1-SOC_min))/(N_cells*I_stack) "Caudal mínimo de electrolito, en L/min (ec. 2.12)"
alpha=((Q_med/60)*F*C_V*(1-0,5*(SOC_max+SOC_min)))/(N_cells*I_stack)
"Caudal medio de electrolito, en L/min (ec. 2.12)"
```

"Pérdidas de presión por metro lineal de tubería, diámetros de 10 a 100 mm, pasando de 5 en 5 mm"

```
Duplicate i = 1:19
```

```
D[i]=5*i + 5 "Diámetro de tubería, en mm"
A_pipe[i]=0,25*pi*((0,1*D[i])^2) "Sección de la tubería, en cm^2"
v[i]=100*((Q_max/60000)/(A_pipe[i]/10000)) "Velocidad del electrolito en la tubería, en cm/s (ec. 2.32)"
Re[i]=(rho*(D[i]/1000)*(v[i]/100))/mu "Número de Reynolds, para este rango de diámetros, siempre hay flujo turbulento (ec. 2.33)"
```



```
-2*(ln((2,51/(Re[i]*sqrt(f[i])))+((epsilon/D[i])/3,71)))/ln(10)=  
1/sqrt(f[i]) "Ecuación de White-Colebrook, permite calcular el factor  
de fricción de Darcy (ec. 2.34)"
```

```
DELTA_P[i]=f[i]*(1000/(D[i])*0,5*rho*((v[i]/100)^2)) "Pérdida de  
presión por metro lineal de tubería, en Pa (ec. 2.35)"  
DELTA_H[i]=DELTA_P[i]/(1000*g) "Pérdida de presión por metro lineal  
de tubería, en metros de columna de agua"
```

End

```
DELTA_P_50=DELTA_P[9] "Pérdida de presión por metro en las tuberías  
de 50 mm"  
DELTA_P_25=DELTA_P[4] "Pérdida de presión por metro en las tuberías  
de 25 mm"
```

"Por los tubos de diámetro 10 mm, fluye la tercera parte del caudal
que en las tuberías principales (debido a los colectores divisores
de caudal, entradas y salidas del stack. Por ello se calculan las
pérdidas de presión por metro para ese diámetro y caudal."

```
v_10=100*((Q_max/3)/60000)/(A_pipe[1]/10000) "Velocidad del  
electrolito en la tubería, en cm/s (ec. 2.32)"  
Re_10=(rho*(D[1]/1000)*(v_10/100))/mu "Número de Reynolds, se tiene  
flujo turbulento (ec. 2.33)"
```

```
-2*(ln((2,51/(Re_10*sqrt(f_10)))+((epsilon/D[1])/3,71)))/ln(10)=  
1/sqrt(f_10) "Cálculo del factor de fricción (ec. 2.34)"  
DELTA_P_10=f_10*(1000/(D[1])*0,5*rho*((v_10/100)^2)) "Pérdida de  
presión por metro en los tubos de 10 mm (ec. 2.35)"
```

"Constantes de pérdidas de los distintos elementos singulares"

```
K_elb_50=0,57 "Constante de pérdidas de los codos de diámetro 50 mm"  
K_elb_25=0,69 "Constante de pérdidas de los codos de diámetro 25 mm"  
K_valve=0,06 "Constante de pérdidas de las válvulas considerándolas  
totalmente abiertas"  
k_inc=0,68 "Constante de pérdidas del aumento progresivo de sección  
de la tubería"  
K_red=0,07 "Constante de pérdidas de la reducción progresiva de  
sección de la tubería"  
K_in=0,5 "Constante de pérdidas de una entrada (inlet)"  
K_out=1 "Constante de pérdidas de una salida (outlet)"  
K_con=0,35 "Constante de pérdidas de una contracción abrupta"  
K_exp=0,7 "Constante de pérdidas de una expansión abrupta "
```

"Línea 1"

```
L_50_1=2,5 "Longitud de tubería de 50 mm en la línea 1, en m"  
L_25_1=1 "Longitud de tubería de 25 mm en la línea 1, en m"  
L_10_1=0,2 "Longitud de tubo de 10 mm en la línea 1, en m"
```



$\Delta P_{dist_1} = \Delta P_{50} \cdot L_{50_1} + \Delta P_{25} \cdot L_{25_1} + \Delta P_{10} \cdot L_{10_1}$
"Pérdidas de presión en el electrolito por fricción con las tuberías
en la línea 1, en Pa (ec. 2.39)"

$\Delta P_{elb_1} = 0,5 \cdot \rho \cdot (3 \cdot K_{elb_50} \cdot ((v[9]/100)^2) + K_{elb_25} \cdot ((v[4]/100)^2))$
"Pérdidas de presión en los codos de la línea 1 (ec. 2.40)"

$\Delta P_{valve_1} = 3 \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot K_{valve} \cdot ((v[9]/100)^2)$ "Pérdidas de
presión en las válvulas de la línea 1 (ec. 2.41)"

$\Delta P_{incred_1} = 0,5 \cdot \rho \cdot (K_{inc} \cdot (((v[4]/100) - (v[9]/100))^2) + K_{red} \cdot ((v[4]/100)^2))$ "Pérdidas de presión en
reducciones e incrementos de sección progresivos de la línea 1
(ec. 2.43)"

$\Delta P_{inout_1} = 0,5 \cdot \rho \cdot ((K_{in} + K_{out}) \cdot ((v_{10}/100)^2 + (v[9]/100)^2))$
"Pérdidas de presión en entradas y salidas de la línea 1 (ec. 2.44)"

$\Delta P_{manifold_1} = 0,5 \cdot \rho \cdot (K_{con} + K_{exp}) \cdot (v_{10}/100)^2$ "Pérdidas de
presión en los colectores divisores de flujo de la línea 1 (ec. 2.45)"

$\Delta P_{Línea1} = \Delta P_{dist_1} + \Delta P_{elb_1} + \Delta P_{valve_1} + \Delta P_{incred_1} + \Delta P_{inout_1} + \Delta P_{manifold_1}$ "Pérdidas de
presión totales en la línea 1 de electrolito (ec. 2.36)"

"Línea 2"

$L_{50_2} = 2,2$ "Longitud de tubería de 50 mm en la línea 1, en m"

$L_{25_2} = 0,25$ "Longitud de tubería de 25 mm en la línea 1, en m"

$L_{10_2} = 0,2$ "Longitud de tubo de 10 mm en la línea 1, en m"

$\Delta P_{dist_2} = \Delta P_{50} \cdot L_{50_2} + \Delta P_{25} \cdot L_{25_2} + \Delta P_{10} \cdot L_{10_2}$
"Pérdidas de presión en el electrolito por fricción con las tuberías
en la línea 1, en Pa (ec. 2.39)"

$\Delta P_{elb_2} = 0,5 \cdot \rho \cdot (4 \cdot K_{elb_50} \cdot ((v[9]/100)^2) + K_{elb_25} \cdot ((v[4]/100)^2))$
"Pérdidas de presión en los codos de la línea 2 (ec. 2.40)"

$\Delta P_{valve_2} = \Delta P_{valve_1}$ "Pérdidas de presión en las
válvulas de la línea 2 (ec. 2.41)"

$\Delta P_{incred_2} = \Delta P_{incred_1}$ "Pérdidas de presión en
reducciones e incrementos de sección progresivos de la línea 2
(ec. 2.43)"

$\Delta P_{inout_2} = \Delta P_{inout_1}$ "Pérdidas de presión en entradas y
salidas de la línea 2 (ec. 2.44)"

$\Delta P_{manifold_2} = \Delta P_{manifold_1}$ "Pérdidas de presión en los
colectores divisores de flujo de la línea 2 (ec. 2.45)"

$\Delta P_{Línea2} = \Delta P_{dist_2} + \Delta P_{elb_2} + \Delta P_{valve_2} + \Delta P_{incred_2} + \Delta P_{inout_2} + \Delta P_{manifold_2}$ "Pérdidas de
presión totales en la línea 2 de electrolito (ec. 2.36)"



$\Delta H_{\text{Línea1}} = \Delta P_{\text{Línea1}} / (\rho \cdot g)$ "Pérdida de presión total en la línea 1 de electrolito, en metros de columna de agua"
 $\Delta H_{\text{Línea2}} = \Delta P_{\text{Línea2}} / (\rho \cdot g)$ "Pérdida de presión total en la línea 2 de electrolito, en metros de columna de agua"

$g = 9,81$ Aceleración de la gravedad, en m/s^2

$\rho = 1354$ Densidad del electrolito, en kg/m^3

$\mu = 0,004928$ Viscosidad dinámica del electrolito, en $Pa \cdot s$ ($Kg/m \cdot s$)

$\varepsilon = 0,0000015$ Rugosidad media del material de las tuberías, en metros

$F = 96485$ Constante de Faraday, expresa la carga eléctrica contenida en un mol de electrones

$SOC_{\max} = 0,8$ Estado de carga máximo al que va a operar la batería

$SOC_{\min} = 0,2$ Estado de carga mínimo al que va a operar la batería

$\alpha = 6$ Factor de flujo (flow factor), se mantiene constante aunque varíe el estado de carga

$C_V = 1,6$ Concentración de vanadio en el electrolito, en mol/L

$C_e = C_V$ Número de moles de electrones intercambiados por litro de electrolito, en mol/L

$C_{H_2SO_4} = 2$ Concentración de ácido sulfúrico en el electrolito, en mol/L

$C_{H_3PO_4} = 0,05$ Concentración de ácido fosfórico en el electrolito, en mol/L

$N_{\text{cells}} = 47$ Número de celdas de la batería

$J = 0,1$ Densidad de corriente de trabajo, en A/cm^2

$A_{\text{cell}} = 900$ Área efectiva de electrodo, en cm^2

$V_{\text{cell}} = 1,2$ Voltaje de una celda del stack, se considera 1'2V

$I_{\text{stack}} = A_{\text{cell}} \cdot J$ Corriente de la batería, en A

$Vol_{\text{electrolyte}} = 10 \cdot 1000 \cdot \frac{3600}{V_{\text{cell}} \cdot C_e \cdot F \cdot (SOC_{\max} - SOC_{\min})}$ Volumen necesario de electrolito, en L

$\alpha = \frac{\frac{Q_{\max}}{60} \cdot F \cdot C_V \cdot (1 - SOC_{\max})}{N_{\text{cells}} \cdot I_{\text{stack}}}$ Caudal máximo de electrolito, en L/min

$\alpha = \frac{\frac{Q_{\min}}{60} \cdot F \cdot C_V \cdot (1 - SOC_{\min})}{N_{\text{cells}} \cdot I_{\text{stack}}}$ Caudal mínimo de electrolito, en L/min

$$\alpha = \frac{\frac{Q_{med}}{60} \cdot F \cdot C_V \cdot (1 - 0,5 \cdot (SOC_{max} + SOC_{min}))}{N_{cells} \cdot I_{stack}}$$

Caudal medio de
electrolito, en L/min

$$D_i = 5 \cdot i + 5 \quad \text{for } i = 1 \text{ to } 19$$

Diámetro de tubería, en mm

$$A_{pipe,i} = 0,25 \cdot \pi \cdot (0,1 \cdot D_i)^2 \quad \text{for } i = 1 \text{ to } 19$$

Sección de la tubería, en cm²

$$v_i = 100 \cdot \frac{\frac{Q_{max}}{60000}}{\frac{A_{pipe,i}}{10000}} \quad \text{for } i = 1 \text{ to } 19$$

Velocidad del electrolito en la tubería, en cm/s

$$Re_i = \frac{\rho \cdot \frac{D_i}{1000} \cdot \frac{v_i}{100}}{\mu} \quad \text{for } i = 1 \text{ to } 19$$

Número de Reynolds, para este rango de
diámetros, siempre hay flujo turbulento

$$\frac{1}{\sqrt{f_i}} = -2 \cdot \frac{\ln \left[\frac{2,51}{Re_i \cdot \sqrt{f_i}} + \frac{\varepsilon}{D_i \cdot 3,71} \right]}{\ln(10)} \quad \text{for } i = 1 \text{ to } 19$$

Ecuación de White-

Colebrook, permite calcular el factor de fricción de Darcy

$$\Delta P_{l,i} = f_i \cdot \frac{1000}{D_i} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot \left[\frac{v_i}{100} \right]^2 \quad \text{for } i = 1 \text{ to } 19$$

Pérdida de presión por metro
lineal de tubería, en Pa

Pérdida de presión por metro

$$\Delta H_{l,i} = \frac{\Delta P_{l,i}}{1000 \cdot g} \quad \text{for } i = 1 \text{ to } 19$$

Pérdida de presión por metro lineal de tubería, en
metros de columna de agua

$$\Delta P_{50} = \Delta P_{l,9} \quad \text{Pérdida de presión por metro en las tuberías de 50 mm}$$

$$\Delta P_{25} = \Delta P_{l,4} \quad \text{Pérdida de presión por metro en las tuberías de 25 mm}$$

$$v_{10} = 100 \cdot \frac{\frac{Q_{max}}{3 \cdot 60000}}{\frac{A_{pipe,1}}{10000}}$$

Velocidad del electrolito en la tubería, en cm/s

$$Re_{10} = \frac{\rho \cdot \frac{D_1}{1000} \cdot \frac{v_{10}}{100}}{\mu}$$

Número de Reynolds, se tiene flujo turbulento

$$\frac{1}{\sqrt{f_{10}}} = -2 \cdot \frac{\ln \left[\frac{2,51}{Re_{10} \cdot \sqrt{f_{10}}} + \frac{\varepsilon}{D_1 \cdot 3,71} \right]}{\ln(10)}$$

Cálculo del factor de fricción

$$\Delta P_{f,10} = f_{10} \cdot \frac{1000}{D_1} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot \left[\frac{v_{10}}{100} \right]^2$$

Pérdida de presión por metro en los tubos de 10 mm

$$K_{elb,50} = 0,57$$

Constante de pérdidas de los codos de diámetro 50 mm

$$K_{elb,25} = 0,69$$

Constante de pérdidas de los codos de diámetro 25 mm

$$K_{valve} = 0,06$$

Constante de pérdidas de las válvulas considerándolas totalmente abiertas

$$K_{inc} = 0,68$$

Constante de pérdidas del aumento progresivo de sección de la tubería

$$K_{red} = 0,07$$

Constante de pérdidas de la reducción progresiva de sección de la tubería

$$K_{in} = 0,5$$

Constante de pérdidas de una entrada (inlet)

$$K_{out} = 1$$

Constante de pérdidas de una salida (outlet)

$$K_{con} = 0,35$$

Constante de pérdidas de una contracción abrupta

$$K_{exp} = 0,7$$

Constante de pérdidas de una expansión abrupta

$$L_{50;1} = 2,5$$

Longitud de tubería de 50 mm en la línea 1, en m

$$L_{25;1} = 1$$

Longitud de tubería de 25 mm en la línea 1, en m

$$L_{10;1} = 0,2$$

Longitud de tubo de 10 mm en la línea 1, en m

$$\Delta P_{dist;1} = \Delta P_{f,50} \cdot L_{50;1} + \Delta P_{f,25} \cdot L_{25;1} + \Delta P_{f,10} \cdot L_{10;1}$$

Pérdidas de presión en el

electrolito por fricción con las tuberías en la línea 1, en Pa

$$\Delta P_{elb;1} = 0,5 \cdot \rho \cdot \left[3 \cdot K_{elb,50} \cdot \left(\frac{v_g}{100} \right)^2 + K_{elb,25} \cdot \left(\frac{v_4}{100} \right)^2 \right]$$

Pérdidas de presión en

los codos de la línea 1

$$\Delta P_{valve;1} = 3 \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot K_{valve} \cdot \left[\frac{v_g}{100} \right]^2$$

Pérdidas de presión en las válvulas de la línea 1

$$\Delta P_{inred;1} = 0,5 \cdot \rho \cdot \left[K_{inc} \cdot \left(\frac{v_4}{100} - \frac{v_g}{100} \right)^2 + K_{red} \cdot \left(\frac{v_4}{100} \right)^2 \right]$$

Pérdidas de presión

en reducciones e incrementos de sección progresivos de la línea 1

$$\Delta P_{inout;1} = 0,5 \cdot \rho \cdot \left[(K_{in} + K_{out}) \cdot \left(\left[\frac{v_{10}}{100} \right]^2 + \left[\frac{v_g}{100} \right]^2 \right) \right]$$

Pérdidas de presión en

entradas y salidas de la línea 1



$$\Delta P_{\text{manifold};1} = 0,5 \cdot \rho \cdot (K_{\text{con}} + K_{\text{exp}}) \cdot \left[\frac{v_{10}}{100} \right]^2$$

Pérdidas de presión en los colectores
divisores de flujo de la línea 1

$$\Delta P_{\text{Línea1}} = \Delta P_{\text{dist};1} + \Delta P_{\text{elb};1} + \Delta P_{\text{valve};1} + \Delta P_{\text{incred};1} + \Delta P_{\text{inout};1} + \Delta P_{\text{manifold};1}$$

Pérdidas
de presión totales en la línea 1 de electrolito

$$L_{50;2} = 2,2$$

Longitud de tubería de 50 mm en la línea 1, en m

$$L_{25;2} = 0,25$$

Longitud de tubería de 25 mm en la línea 1, en m

$$L_{10;2} = 0,2$$

Longitud de tubo de 10 mm en la línea 1, en m

$$\Delta P_{\text{dist};2} = \Delta P_{50} \cdot L_{50;2} + \Delta P_{25} \cdot L_{25;2} + \Delta P_{10} \cdot L_{10;2}$$

Pérdidas de presión en el
electrolito por fricción con las tuberías en la línea 1, en Pa

$$\Delta P_{\text{elb};2} = 0,5 \cdot \rho \cdot \left[4 \cdot K_{\text{elb};50} \cdot \left(\frac{v_9}{100} \right)^2 + K_{\text{elb};25} \cdot \left(\frac{v_4}{100} \right)^2 \right]$$

Pérdidas de presión en
los codos de la línea 2

$$\Delta P_{\text{valve};2} = \Delta P_{\text{valve};1}$$

Pérdidas de presión en las válvulas de la línea 2

$$\Delta P_{\text{incred};2} = \Delta P_{\text{incred};1}$$

Pérdidas de presión en reducciones e incrementos de sección
progresivos de la línea 2

$$\Delta P_{\text{inout};2} = \Delta P_{\text{inout};1}$$

Pérdidas de presión en entradas y salidas de la línea 2

$$\Delta P_{\text{manifold};2} = \Delta P_{\text{manifold};1}$$

Pérdidas de presión en los colectores divisores de flujo de la línea 2

$$\Delta P_{\text{Línea2}} = \Delta P_{\text{dist};2} + \Delta P_{\text{elb};2} + \Delta P_{\text{valve};2} + \Delta P_{\text{incred};2} + \Delta P_{\text{inout};2} + \Delta P_{\text{manifold};2}$$

Pérdidas
de presión totales en la línea 2 de electrolito

$$\Delta H_{\text{Línea1}} = \frac{\Delta P_{\text{Línea1}}}{\rho \cdot g}$$

Pérdida de presión total en la línea 1 de electrolito, en metros de
columna de agua

$$\Delta H_{\text{Línea2}} = \frac{\Delta P_{\text{Línea2}}}{\rho \cdot g}$$

Pérdida de presión total en la línea 2 de electrolito, en metros de columna
de agua



$\square = 6$ [-]	$A_{\text{cell}} = 900$ [cm ²]	$C_e = 1,6$ [mol _e /L]
$C_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 2$ [mol _{H2SO4} /L]	$C_{\text{H}_3\text{PO}_4} = 0,05$ [mol _{H3PO4} /L]	$C_V = 1,6$ [mol _V /L]
$\square_{\text{H,Línea1}} = 2,349$ [mca]	$\square_{\text{H,Línea2}} = 2,225$ [mca]	$\square_{\text{P,10}} = 25736$ [Pa/m]
$\square_{\text{P,25}} = 2261$ [Pa/m]	$\square_{\text{P,50}} = 85,27$ [Pa/m]	$\square_{\text{P,dist,1}} = 7621$ [Pa]
$\square_{\text{P,dist,2}} = 5900$ [Pa]	$\square_{\text{P,elb,1}} = 1513$ [Pa]	$\square_{\text{P,elb,2}} = 1581$ [Pa]
$\square_{\text{P,incred,1}} = 859,1$ [Pa]	$\square_{\text{P,incred,2}} = 859,1$ [Pa]	$\square_{\text{P,inout,1}} = 12538$ [Pa]
$\square_{\text{P,inout,2}} = 12538$ [Pa]	$\square_{\text{P,Línea1}} = 31204$ [Pa]	$\square_{\text{P,Línea2}} = 29551$ [Pa]
$\square_{\text{P,manifold,1}} = 8652$ [Pa]	$\square_{\text{P,manifold2}} = 8652$ [Pa]	$\square_{\text{P,valve,1}} = 21,36$ [Pa]
$\square_{\text{P,valve,2}} = 21,36$ [Pa]	$\square = 0,0000015$ [m]	$F = 96485$ [C/mol _e]
$f_{10} = 0,03123$ [-]	$g = 9,81$ [m/s ²]	$I_{\text{stack}} = 90$ [A]
$J = 0,1$ [A/cm ²]	$K_{\text{con}} = 0,35$ [-]	$K_{\text{elb,25}} = 0,69$ [-]
$K_{\text{elb,50}} = 0,57$ [-]	$K_{\text{exp}} = 0,7$ [-]	$K_{\text{in}} = 0,5$ [-]
$k_{\text{inc}} = 0,68$ [-]	$K_{\text{out}} = 1$ [-]	$K_{\text{red}} = 0,07$ [-]
$K_{\text{valve}} = 0,06$ [-]	$L_{10,1} = 0,2$ [m]	$L_{10,2} = 0,2$ [m]
$L_{25,1} = 1$ [m]	$L_{25,2} = 0,25$ [m]	$L_{50,1} = 2,5$ [m]
$L_{50,2} = 2,2$ [m]	$\square = 0,004928$ [kg/(m.s)]	$N_{\text{cells}} = 47$ [celdas]
$Q_{\text{max}} = 49,32$ [L/min]	$Q_{\text{med}} = 19,73$ [L/min]	$Q_{\text{min}} = 12,33$ [L/min]
$Re_{10} = 9586$ [-]	$\square = 1354$ [kg/m ³]	$SOC_{\text{max}} = 0,8$ [-]
$SOC_{\text{min}} = 0,2$ [-]	$Vol_{\text{electrolyte}} = 323,9$ [L]	$v_{10} = 348,9$ [cm/s]
$V_{\text{cell}} = 1,2$ [V]		

Figura A.4. Ventana de resultados de EES para el programa 3.

Arrays Table							
Main							
Sort	D_i [mm]	$A_{pipe,i}$ [cm ²]	v_i [cm/s]	Re_i [-]	f_i [-]	$\Delta P_{f,i}$ [Pa/m]	$\Delta H_{f,i}$ [mca/m]
[1]	10	0,7854	1046,63	28757	0,02372	175898	17,93
[2]	15	1,767	465,17	19171	0,02615	25542	2,604
[3]	20	3,142	261,66	14378	0,02811	6514	0,664
[4]	25	4,909	167,46	11503	0,02977	2261	0,2304
[5]	30	7,069	116,29	9586	0,03123	953,2	0,09716
[6]	35	9,621	85,44	8216	0,03255	459,6	0,04685
[7]	40	12,57	65,41	7189	0,03376	244,5	0,02492
[8]	45	15,9	51,69	6390	0,03488	140,2	0,01429
[9]	50	19,63	41,87	5751	0,03593	85,27	0,008692
[10]	55	23,76	34,60	5229	0,03692	54,4	0,005545
[11]	60	28,27	29,07	4793	0,03785	36,1	0,00368
[12]	65	33,18	24,77	4424	0,03874	24,76	0,002524
[13]	70	38,48	21,36	4108	0,03959	17,47	0,001781
[14]	75	44,18	18,61	3834	0,04041	12,63	0,001287
[15]	80	50,27	16,35	3595	0,0412	9,324	0,0009504
[16]	85	56,75	14,49	3383	0,04196	7,012	0,0007148
[17]	90	63,62	12,92	3195	0,04269	5,361	0,0005465
[18]	95	70,88	11,60	3027	0,0434	4,159	0,000424
[19]	100	78,54	10,47	2876	0,04409	3,27	0,0003333

Figura A.5. Ventana de arrays de EES para el programa 3 en forma de tabla.

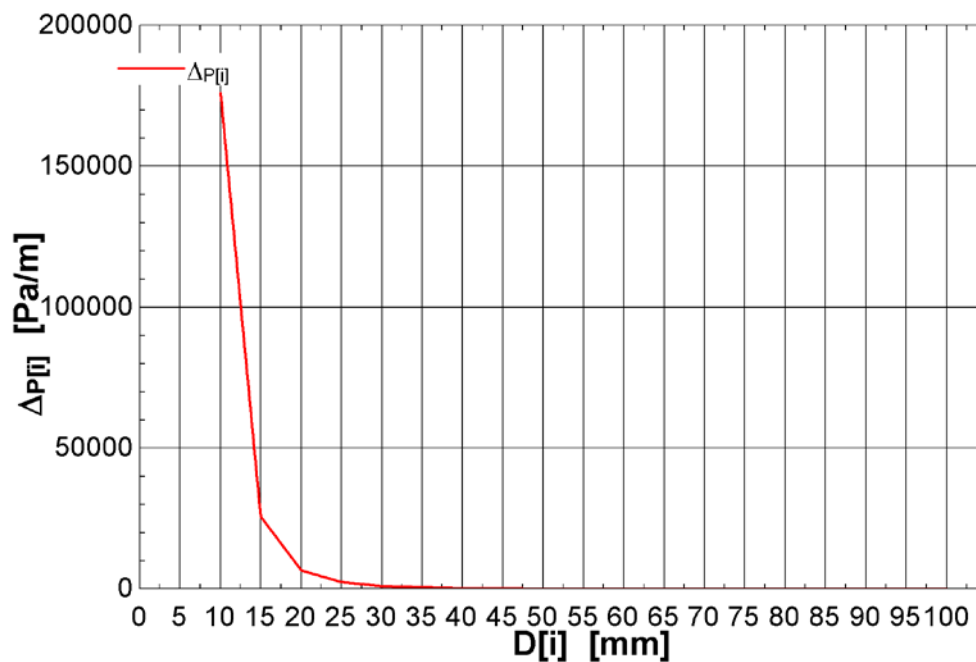


Figura A.6. Ventana de plots de EES para el programa 3. Puede verse la pérdida de presión por metro de tubería en función del diámetro para el caudal máximo de diseño.

Anexo B. Cálculos complementarios

A lo largo de este anexo se desarrollarán algunos cálculos de diversa índole que complementan los mostrados en la memoria.

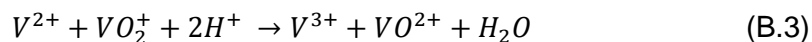
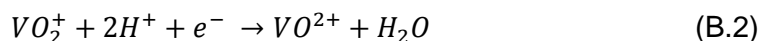
En el apartado B.1 se exponen de forma más detallada algunos de los cálculos electroquímicos (apartado 2.2 de la memoria) así como la determinación de las cantidades de cada especie a emplear para elaborar el electrolito. El apartado B.2 por su parte se centra en el rack, estimando el peso que soportará y realizando una simulación de la estructura con un software de cálculo estructural.

Por último, en el apartado B.3, de temática hidráulica, se realiza la comprobación de que no se producirá cavitación en las bombas durante la operación de la batería.

B.1. Cálculos químicos complementarios

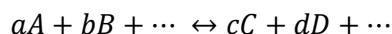
B.1.1. Determinación del voltaje promedio de celda

Los potenciales estándar de reducción de las semirreacciones que tienen lugar en las celdas de la batería de flujo (ecuaciones B.1 y B.2) son respectivamente -0,255 V y 1,004 V. El potencial estándar de la reacción global (V^0) que se muestra en B.3 viene dado por la expresión B.4, siendo éste por tanto 1,259 V.



$$V^0 = V_{reducción}^0 - V_{oxidación}^0 \quad (B.4)$$

Como las condiciones durante la operación no serán estándar (1 atm, 25 °C, concentración de iones 1 mol/L), se determina el nuevo potencial (potencial de equilibrio, V_{eq}) de la reacción mediante la ecuación de Nernst. Para una reacción de la forma



será:

$$V_{eq} = V^0 - \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left[\frac{C_C^c \cdot C_D^d \dots}{C_A^a \cdot C_B^b \dots} \right] \quad (B.5)$$

siendo C_I la concentración de la especie iónica I de la reacción, e i el coeficiente estequiométrico de dicho ion. Aplicando la expresión B.5 en la reacción B.3 se tiene:

$$V_{eq} = V^0 - \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left[\frac{C_{V(III)} \cdot C_{V(IV)}}{C_{V(II)} \cdot C_{V(V)} \cdot (C_{H^+})^2} \right] \quad (B.6)$$

La concentración de agua no se incluye en esta expresión ya que no es una especie iónica. La ecuación de Nernst permite estimar el voltaje de la batería para unas concentraciones de electrolitos determinadas. Sin embargo, las concentraciones de las especies son variables a lo largo de la operación de la misma según se encuentra más cargada o menos, por lo que resulta más práctico expresar el voltaje en función del estado de carga de la batería (*SoC*). El *SoC* se define mediante la ecuación B.7 si se habla en términos del electrolito negativo, o mediante la ecuación B.8 si se trata del positivo.

$$SoC = \frac{C_{V(II)}}{C_{V(II)} + C_{V(III)}} = 1 - \frac{C_{V(III)}}{C_{V(II)} + C_{V(III)}} \quad (B.7)$$

$$SoC = \frac{C_{V(V)}}{C_{V(IV)} + C_{V(V)}} = 1 - \frac{C_{V(IV)}}{C_{V(IV)} + C_{V(V)}} \quad (B.8)$$

Para simplificar las expresiones, se definen α , β y γ como:

$$\begin{aligned} \alpha &= C_{V(II)} = C_{V(V)} \\ \beta &= C_{V(III)} = C_{V(IV)} \\ \gamma &= C_{V(IV)} + C_{V(V)} \end{aligned} \quad (B.9)$$

Por tanto, la ecuación B.6 puede escribirse de la siguiente forma:

$$V_{eq} = V^0 - \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left[\frac{\beta^2}{\alpha^2 \cdot (C_{H^+})^2} \right] \quad (B.10)$$

Si se expresa el estado de carga en función de α , β y γ se tiene:

$$SoC = \frac{\alpha}{\gamma} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \quad (B.11)$$

Aplicando la igualdad B.11 en la ecuación B.10,

$$V_{eq} = V^0 - \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left[\left(\frac{1 - SoC}{SoC} \right)^2 \cdot \frac{1}{(C_{H^+})^2} \right] \quad (B.12)$$

Desarrollando la expresión aplicando propiedades de los logaritmos se tiene que:

$$V_{eq} = V^0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{SoC}{1 - SoC} \right)^2 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln(C_{H^+})^2 \quad (B.13)$$

Por último, si se denomina V_H^0 al término

$$V_H^0 = V^0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln(C_{H^+})^2 \quad (B.14)$$

El potencial de equilibrio de celda expresado en función del estado de carga es

$$V_{eq} = V_H^0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{SoC}{1 - SoC} \right)^2 \quad (B.15)$$

Los valores de cada uno de los parámetros implicados se adjuntan en la tabla B.1. Como se quiere calcular el potencial *medio* de celda, se considera como SoC de cálculo el promedio de los valores límite de estado de carga, que durante la operación serán 0,8 y 0,2.

Tabla B.1. Parámetros electroquímicos para el cálculo del potencial medio de celda.

Parámetro		Valor
R	Constante universal de los gases	8,314 J/mol·K
T	Temperatura durante la operación	298 K
n	Número de moles intercambiados en la reacción	1 mol e ⁻
F	Constante de Faraday, carga en un mol de e ⁻	96485 C/mol e ⁻
C_{H^+}	Concentración de protones en la reacción	4 mol/L
V^0	Potencial estándar de reducción de la reacción	1,259 V
SoC	Estado de carga, se considera el medio	0,5

La concentración de protones puede considerarse constante en ambos electrolitos (4 mol/L), obteniéndose que el potencial medio de equilibrio de celda V_{eq} son 1,33 V (potencial a circuito abierto). Sin embargo, tal como se dijo en la memoria, este potencial medio dista de ser 1,33 V, dada la existencia de diversas pérdidas: resistencia eléctrica que presentan los componentes de la celda, sobrepotenciales de activación de los

electrodos y sobrepotenciales de concentración del electrolito, puesto que los voltajes no son idénticos en todas las celdas. Se define V_m como:

$$V_m = V_H^0 - V_{act} - V_{con} - V_{ohm} \quad (B.16)$$

Se considera que $V_{act} \cong 0,005$ V, y $V_{con} \cong 0,02$ V según [A1]. Para calcular las pérdidas por resistencia eléctrica se utilizan las propiedades de los materiales de los distintos elementos que forman la celda que se muestran en la tabla B.2, donde se ha incluido una contribución por resistencia de contacto entre componentes y del propio electrolito.

Teniendo en cuenta que la conductividad (σ) cuya unidad es S/m (Siemens/metro) es la inversa de la resistividad (ρ), que se define como:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} \quad (B.17)$$

Siendo A y L la sección transversal y la longitud del elemento conductor, respectivamente. Considerando el área efectiva de electrodo (900 cm^2) como sección transversal A , la resistencia se determina como:

$$R = \frac{L}{A \cdot \sigma} \quad (B.18)$$

Tabla B.2. Propiedades de los elementos que conforman la celda.

Elemento	Material	Conductividad (S/m)	Longitud (m)	Resistencia (Ω)
Membrana	Nafion 117	10,0	$1,83 \cdot 10^{-4}$	$2,033 \cdot 10^{-4}$
Electrodo	Sigracell GFA6EA	83,3	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$4,002 \cdot 10^{-4}$
Placa Bipolar	Grafito	5300,0	$5,00 \cdot 10^{-3}$	$1,048 \cdot 10^{-5}$
Contacto	-	-	-	$2,000 \cdot 10^{-4}$ [A1]
Electrolito	-	-	-	$2,000 \cdot 10^{-4}$ [A1]

Una vez conocida la resistencia que aporta cada elemento, el voltaje de pérdidas se calcula mediante la ley de Ohm, siendo $I = 90$ A, la corriente de la celda.

$$V_{ohm} = I \cdot (R_{memb} + 2 \cdot R_{electrodo} + R_{pbip} + R_{cont} + R_{electrolito}) \quad (B.19)$$

La expresión B.19 asigna a una celda la resistencia que aporta una membrana, dos electrodos, una placa bipolar, el electrolito y las uniones entre elementos, obteniéndose que V_{ohm} es aproximadamente 0,1273 V, y con ello V_m es 1,178 V.

El potencial de celda es por tanto:

$$V_{cell} = V_m + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{SoC}{1 - SoC} \right)^2 = V_m + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot 2 \cdot \ln \left(\frac{SoC}{1 - SoC} \right) \quad (B.20)$$

Por último, como el voltaje de celda depende del SoC, se realiza el promedio integrando a lo largo del rango que toma el estado de carga durante la operación, es decir:

$$\begin{aligned} \overline{V_{cell}} &= \frac{1}{SoC_{max} - SoC_{min}} \cdot \int_{SoC_{min}}^{SoC_{max}} V_{cell} \cdot dSoC \\ \overline{V_{cell}} &= \frac{1}{SoC_{max} - SoC_{min}} \cdot \int_{SoC_{min}}^{SoC_{max}} \left[V_m + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot 2 \cdot \ln \left(\frac{SoC}{1 - SoC} \right) \right] \cdot dSoC \end{aligned} \quad (B.21)$$

En los siguientes párrafos se desarrolla la integral anterior y se obtiene el resultado final. Aplicando las propiedades de los logaritmos, se tiene que la integral a resolver es:

$$\int_{SoC_{min}}^{SoC_{max}} \left[V_m + \frac{2 \cdot R \cdot T}{n \cdot F} \cdot (\ln(SoC) - \ln(1 - SoC)) \right] \cdot dSoC \quad (B.22)$$

El primer término se integra fácilmente, resultando:

$$\left[V_m \cdot SoC \right]_{SoC_{min}}^{SoC_{max}} + \frac{2 \cdot R \cdot T}{n \cdot F} \int_{SoC_{min}}^{SoC_{max}} [(\ln(SoC) - \ln(1 - SoC))] \cdot dSoC \quad (B.23)$$

Por las propiedades de las integrales, la integral resultante (la parte que aún no se ha integrado) se divide en dos, que se resuelven por separado. Aplicando el método de integración por partes al primer término se obtiene que:

$$\int_{SoC_{min}}^{SoC_{max}} \ln(SoC) \cdot dSoC = [SoC \cdot \ln(SoC)]_{SoC_{min}}^{SoC_{max}} - \int_{SoC_{min}}^{SoC_{max}} dSoC \quad (B.24)$$

Habiéndose considerado que $u = \ln(SoC)$ y que $dv = dSoC$. Al resolver la integral restante que es inmediata, resulta:

$$\int_{SoC_{min}}^{SoC_{max}} \ln(SoC) \cdot dSoC = [SoC \cdot (\ln(SoC) - 1)]_{SoC_{min}}^{SoC_{max}} \quad (B.25)$$

Se procede a resolver la segunda integral. Si se hace un cambio de variable con $t = 1 - SoC$, la integral se simplifica mucho.

$$\int_{SoC_{min}}^{SoC_{max}} \ln(1 - SoC) \cdot dSoC = - \int_{1-t_{min}}^{1-t_{max}} \ln(t) \cdot dt \quad (B.26)$$

La integral obtenida se ha resuelto anteriormente. Tras operar de forma análoga y deshacer el cambio de variable:

$$\int_{SoC_{min}}^{SoC_{max}} \ln(1 - SoC) \cdot dSoC = [(1 - SoC) \cdot (1 - \ln(1 - SoC))]_{SoC_{min}}^{SoC_{max}} \quad (B.27)$$

Al unir los resultados B.25 y B.27 con la ecuación B.23 se tiene que:

$$\left[V_m \cdot SoC + \frac{2 \cdot R \cdot T}{n \cdot F} \cdot (SoC \cdot (\ln(1 - SoC) - 1) - (1 - SoC) \cdot (1 - \ln(1 - SoC))) \right]_{SoC_{min}}^{SoC_{max}} \quad (B.28)$$

Si se denomina Int a la expresión B.28, el voltaje promedio de celda será:

$$\overline{V_{cell}} = \frac{Int}{SoC_{max} - SoC_{min}} \quad (B.29)$$

Sustituyendo con los valores de la tabla B.1 y siendo $SoC_{max} = 0,8$ y $SoC_{min} = 0,2$, se obtiene que $\overline{V_{cell}} = 1,177923...$ que, para facilitar los cálculos de la batería posteriores, se redondea a 1,2 V, llamado V_{celda} en la memoria.

B.1.2. Cálculo de la composición del electrolito

En primer lugar, para mostrar los datos de forma más ordenada, se adjuntan en la tabla B.3 para cada componente del electrolito (ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido fosfórico (H_3PO_4) y vanadio (V)) su concentración, su masa molecular o molar y su densidad.



Tabla B.3. Propiedades de los componentes del electrolito.

Especie	Concentración (mol/L)	Masa molecular/molar (g/mol)	Densidad (g/cm ³)
H ₂ SO ₄	2,00	98,08	1,83
H ₃ PO ₄	0,05	97,99	1,88
V	1,60	50,94	-

A continuación, se desarrollan los cálculos de cada especie, teniendo en cuenta que hay que producir $2 \text{ depósitos} \cdot 323,9 \frac{L}{\text{depósito}} = 647,8$ litros de electrolito.

- *Ácido sulfúrico:*

El primer paso consiste en calcular los moles necesarios, $647,8 L \cdot 2 \frac{\text{mol}}{L} = 1295,6$ moles de ácido sulfúrico se necesitan. El fabricante indica que la pureza de su ácido es del 98%, luego, para obtener 1295,6 moles:

$$1295,6 \text{ mol} \cdot \frac{1}{0,98} \cdot 98,08 \frac{g}{\text{mol}} \cdot \frac{1}{1,83} \frac{\text{cm}^3}{g} \cdot \frac{1}{1000} \frac{L}{\text{cm}^3} = 70,86 L$$

Así que se necesitan 70,86 L de ácido sulfúrico para producir el electrolito.

- *Ácido fosfórico:*

En este caso se necesitarán $647,8 L \cdot 0,05 \frac{\text{mol}}{L} = 32,39$ moles de ácido fosfórico. La pureza según indica el fabricante es del 85%, por lo tanto, para obtener 32,39 moles:

$$32,39 \text{ mol} \cdot \frac{1}{0,85} \cdot 97,99 \frac{g}{\text{mol}} \cdot \frac{1}{1,88} \frac{\text{cm}^3}{g} \cdot \frac{1}{1000} \frac{L}{\text{cm}^3} = 1,99 L$$

Se necesitan 1,99 L de ácido fosfórico para producir el electrolito.

- *Vanadio:*

Se producen los dos electrolitos utilizando el mismo compuesto de vanadio, y se generan los iones a emplear mediante procesos de electrólisis. Por tanto, se calcula análogamente a los casos anteriores, sin diferenciar entre electrolito positivo y negativo. En primer lugar, los moles necesarios son $647,8 L \cdot 1,6 \frac{\text{mol}}{L} = 1036,48$ moles.

El compuesto a utilizar es sólido, y tiene un porcentaje de vanadio en masa del 20%, con lo cual:



$$1036,48 \text{ mol} \cdot \frac{1}{0,2} \cdot 50,94 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot \frac{1}{1000} \frac{\text{kg}}{\text{g}} = 264 \text{ kg}$$

Se requieren 264 kg de compuesto de vanadio (sulfato de vanadilo hidratado) para producir el electrolito.

Al realizar la disolución, los volúmenes no son aditivos puesto que los solutos reaccionan entre sí variando su densidad, etc. Por ese motivo no se calcula la cantidad de agua necesaria, simplemente se va agregando a los solutos hasta alcanzar el volumen de disolución deseado, es decir, los 647,8 litros.

B.2. Cálculos relativos al rack

B.2.1. Cálculo de las ruedas para el rack

La instalación de batería de flujo está pensada para que permanezca en una ubicación fija una vez esté construida y comience a operar. Por este motivo el rack se construirá con ruedas abatibles, que permitan trasladar la instalación hasta su emplazamiento final, donde se le retirarán las ruedas, quedando entonces sostenida por las patas fijas, para que pueda operar de manera estática.

Sin embargo, el rack no estará cargado del todo hasta colocarse en su ubicación definitiva, es decir, se instalarán las líneas de bombeo, se colocará el *stack*, etc. tal como se menciona en la memoria, pero los depósitos se encontrarán vacíos (el electrolito supone un peso considerable), facilitando así el traslado. Una vez ubicada la instalación, estando ya soportada mediante las patas fijas tras quitarle las ruedas, se generarán los electrolitos en los depósitos a partir de la correspondiente disolución, y podrá comenzar la operación de la batería.

En primer lugar, se calcula el peso que deben soportar las ruedas del rack, puesto que si se instalan unas ruedas inadecuadas y colapsan, se producen numerosos inconvenientes y retrasos de la puesta en marcha de la batería. Los pesos se calculan de forma detallada, englobándolos en distintas categorías.

- *Rack*:

Se considera que el peso de la estructura metálica lo conforman los pesos de los perfiles de aluminio y las escuadras que los unen, es decir:

$$W_{rack} = W_{esc} + W_{perf} = n_{esc} \cdot w_{esc} + w_{perf} \cdot \sum_{i=a}^g n_{perf,i} \cdot L_i \quad (\text{B.30})$$

Siendo w_{perf} 1,6 kg/m [A2] y estimándose que w_{esc} es 0,25 kg/ud. Las distintas longitudes de los tramos de perfil que conforman el rack y el número de unidades de cada uno de ellos se desglosan en la tabla B.4.

Tabla B.4. Longitudes y cantidad de perfiles que conforman el rack.

Designación	Longitud (mm)	Nº unidades
a	1650	2
b	1950	2
c	2210	7
d	1710	6
e	715	2
f	690	1
g	540	6

Respecto al número de escuadras, cada perfil se une a los otros mediante una escuadra en cada extremo, necesitándose 44 escuadras, como puede verse en la figura B.1. Una vez conocidos todos los datos numéricos y sustituyendo en la ecuación B.30, se obtiene que el rack pesa 72,3 kg.

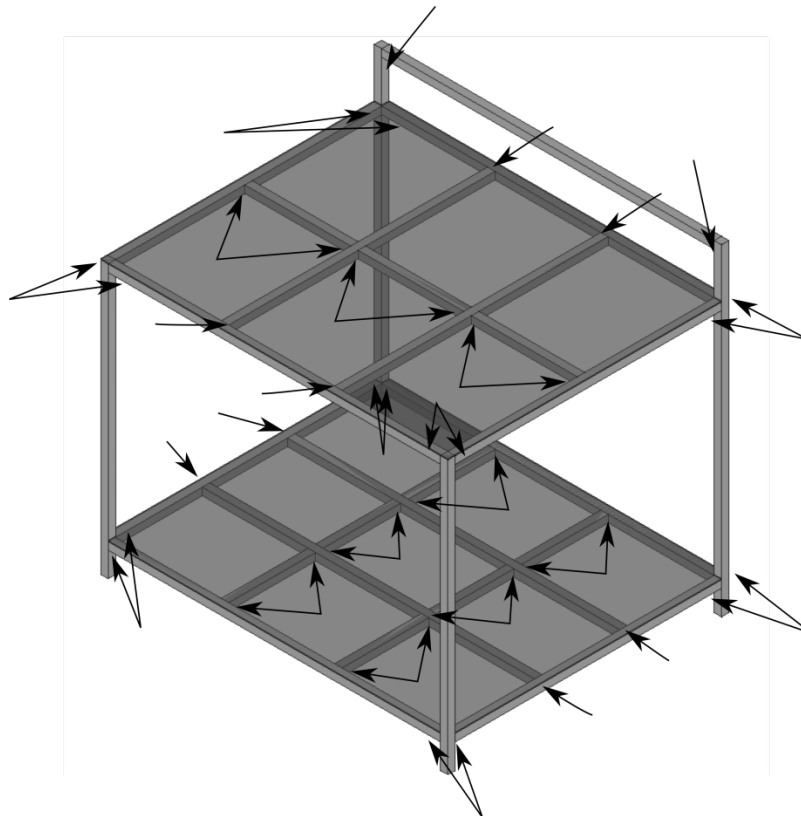


Figura B.1. Ubicación de las escuadras de unión de perfiles. Fuente: Elaboración propia.



- *Stack*:

El peso de algunos elementos como las membranas iónicas se considera despreciable para este cálculo. Para simplificar los cálculos, no se va a detallar completamente la geometría de los distintos elementos, por ejemplo, los marcos de flujo se consideran placas macizas con un vaciado en el centro donde se colocan los electrodos, pero no se tienen en cuenta los rebajes, colectores y otros detalles menores de los demás componentes al determinar el peso mediante la ecuación:

$$W_{stack} = n_{mar} \cdot w_{mar} + n_{bpp} \cdot w_{bpp} + n_{ter} \cdot w_{ter} + n_{col} \cdot w_{col} + n_{pre} \cdot w_{pre} + W_{aux} \quad (B.31)$$

Se calcula el peso de cada tipo de placa como el producto de su sección por su espesor por la densidad del material del que está fabricada. Todos los datos necesarios se adjuntan en la tabla B.5.

Tabla B.5. Longitudes y cantidad de perfiles que conforman el rack.

<i>Elemento</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Sección (cm²)</i>	<i>Espesor (cm)</i>	<i>Densidad (g/cm³)</i>	<i>Peso (kg)</i>
Marco de flujo	94	700	0,3	1,20	23,688
P. Bipolar	48	1600	0,5	1,93	74,112
P. Terminal	2	2500	2,0	7,80	78,000
P. Colectora de corriente	2	1600	0,1	8,96	2,867
P. Presión	2	1600	0,3	1,40	1,344
Auxiliares	-	-	-	-	10,000

Las densidades se determinan para cada uno de los materiales empleados, que son el policarbonato para los marcos de flujo, el grafito para las placas bipolares, el acero para las placas terminales, el cobre para las placas colectoras de corriente, y la baquelita para las placas de presión. Por último, se ha estimado un peso de elementos auxiliares de 10 kg, en el que se incluyen los sistemas de cierre a presión, la tornillería, etc. Como resultado se obtiene que el peso del *stack* es de aproximadamente 190 kg.

- *Tuberías y auxiliares*:

En esta última sección se engloban todos los elementos que conforman las líneas de bombeo de electrolito (tuberías, bombas...) y el resto de componentes de la instalación, como equipo informático etc. Dada la poca información relativa a pesos proporcionada por los fabricantes, se suponen al alza la mayoría de ellos.

Tabla B.6. Pesos de los elementos de la red de tuberías y auxiliares.

<i>Elemento</i>	<i>Peso (kg)</i>
Bombas (2 ud)	13,6 [A3]
Depósitos (2 ud)	10,0
Cubeto de retención	15,0
Tuberías	25,0
Conexiones (Codos, válvulas, tés...)	5,0
Armarios eléctricos, sistema de control	20,0
Equipo informático	10,0

Sumando los distintos elementos, se estima un peso de 98,6 kg en las líneas de bombeo de electrolito y auxiliares de la instalación. Por lo tanto, el peso que deberán soportar las ruedas del rack es:

$$W_{inst} = W_{rack} + W_{stack} + W_{tubaux} \quad (B.32)$$

Lo que supone aproximadamente 360 kg. Aun así, al haberse estimado los pesos de diversos componentes de la instalación, se seleccionan ruedas capaces de soportar al menos 400 kg, para mayor seguridad.

B.2.2. Simulación informática del rack

En proyectos previos del LIFTEC ya se ha empleado este tipo de perfil, y dados los buenos resultados obtenidos, también van a utilizarse en este. Aun así, se realiza una breve simulación con ayuda del software CESTRI, para confirmar que el rack resiste la carga a la que se someterá durante la operación de la batería.

El primer paso es introducir la estructura simplificada en el programa, colocando los nudos y uniéndolos mediante barras. Como los perfiles están atornillados, toda la estructura está ensamblada mediante nudos rígidos, y con apoyos fijos en el suelo. En la figura B.2 se muestra la representación del rack en el software.

CESTRI dispone de una biblioteca de materiales de construcción y perfiles estructurales. El aluminio está incluido (densidad, módulo de Young, límite elástico, de rotura, coeficiente de dilatación...) por lo que no es necesario introducir las propiedades del material. El software solicita una serie de propiedades para el perfil, las cuales se han obtenido de la web del fabricante [A2], y se resumen en la tabla B.7.

El siguiente paso consiste en crear una hipótesis de carga antes de introducir las fuerzas a las que se ve sometido el rack. Al ser conocido su valor, se consideran los efectos del peso propio de la estructura.

Tabla B.7. Propiedades estructurales de los perfiles de aluminio del rack.

Parámetro		
Área	6	cm ²
Momento de inercia respecto a X	11,7	cm ⁴
Momento de inercia respecto a Y	11,7	cm ⁴
Área cortante respecto a X	5,2	cm ³
Área cortante respecto a Y	5,2	cm ³
Módulo de torsión	1,46	cm ⁴

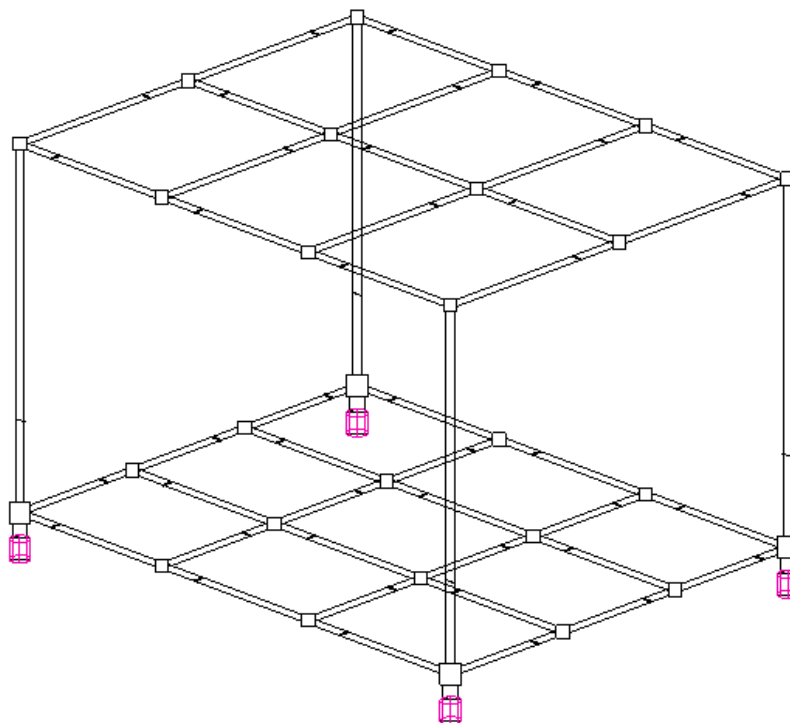


Figura B.2. Representación del rack en CESTRI. Fuente: Elaboración propia.

Por último, hay que definir las cargas sobre la estructura. Sobre los dos niveles en los que se distribuye la instalación se colocan sendas rejillas metálicas que distribuyen uniformemente las cargas a las barras que lo soportan. A continuación, se muestra la distribución de pesos según los niveles.

- Inferior: Electrolito, bombas, cubeto, depósitos, tuberías y conexiones. El peso del electrolito se calcula como su densidad (considerada 1354 kg/m³) por su volumen (647,8 L). En total, sobre el nivel inferior actúan aproximadamente 950 kg.

- Superior: *Stack*, equipo informático, armarios eléctricos, sistema eléctrico. En total, sobre el nivel superior del rack actúan 220 kg.

El área sobre la que se distribuye la carga en ambos niveles es de $180 \cdot (230) = 41400 \text{ cm}^2$, siendo entonces $q_{inf} = 0,0229 \text{ kg/cm}^2$ y $q_{sup} = 0,0053 \text{ kg/cm}^2$ respectivamente. Dichas cargas se convierten en lineales al actuar sobre los perfiles en función de su área de influencia (qué "cantidad" de toda la carga corresponde a cada barra en función de la distancia entre ellas). En las figuras B.3 y B.4 se muestran dichas cargas lineales, que se introducen en el programa.

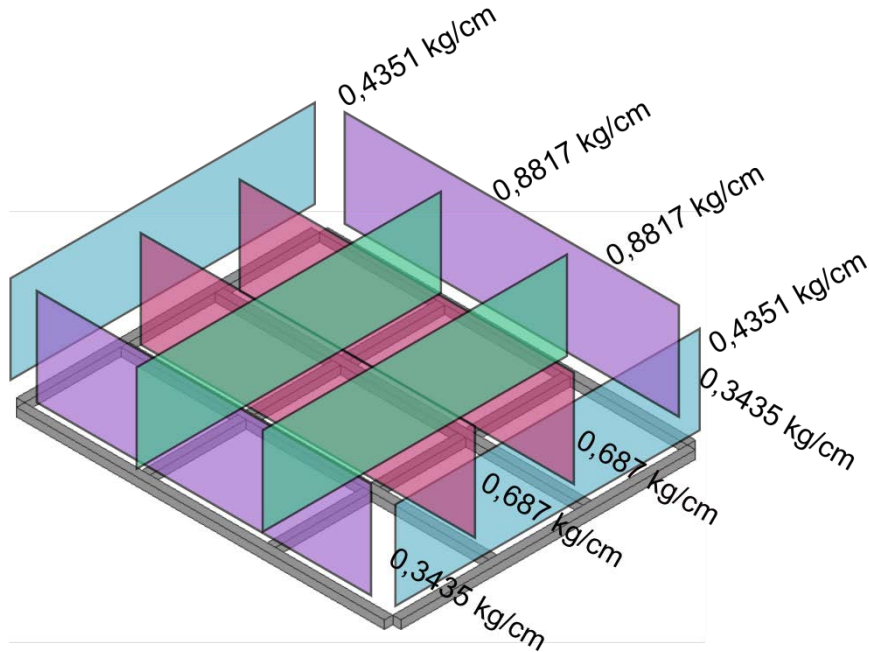


Figura B.3. Distribución de cargas en los perfiles del nivel inferior. Fuente: Elaboración propia.

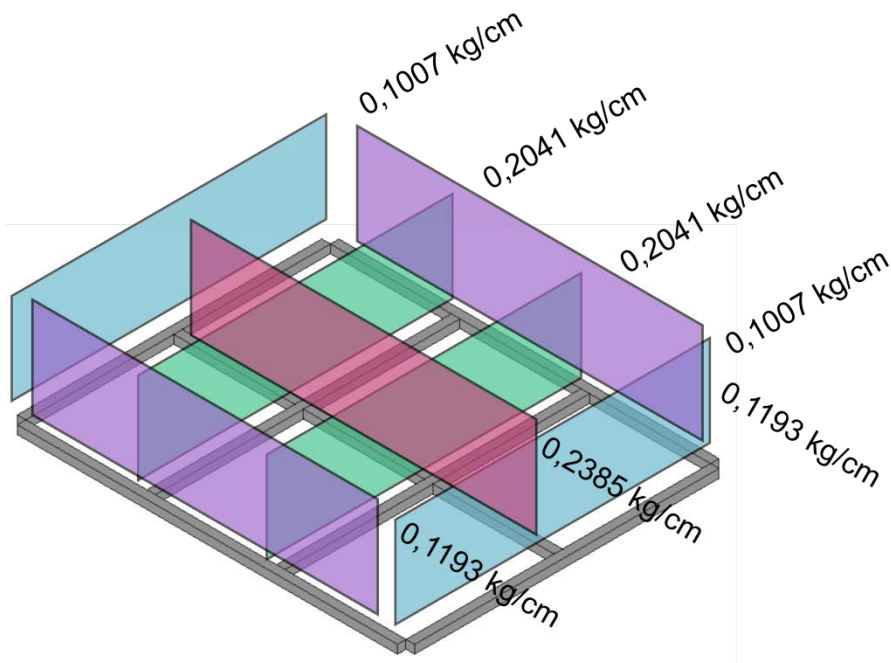


Figura B.4. Distribución de cargas en los perfiles del nivel superior. Fuente: Elaboración propia.

Tras realizar la simulación, se confirma que la estructura es capaz de soportar la carga, pues no se superan los límites del material. Como curiosidad, se adjunta la forma que adquiere la estructura deformada (CESTRl aumenta considerablemente de escala los desplazamientos para que puedan ser apreciables gráficamente).

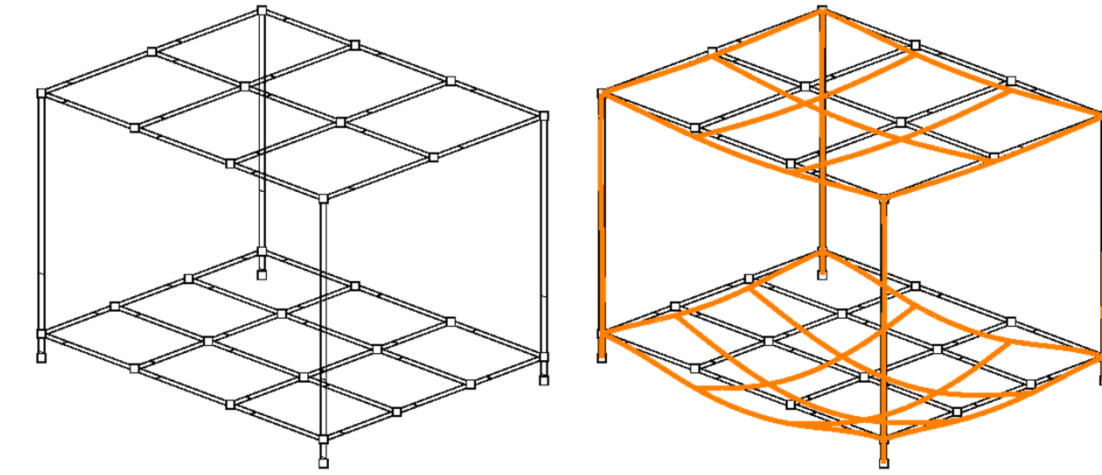


Figura B.5. Representación ampliada de la deformada del rack por el efecto de las cargas a las que se ve sometido. Fuente: Elaboración propia.

B.3. Cálculos hidráulicos

B.3.1. Comprobación de cavitación

Cuando un líquido a una temperatura dada se encuentra a una presión del orden de su presión de vapor a esa temperatura, éste entra en ebullición. En una instalación de bombeo de fluido la cavitación se origina en el punto de menor presión de la misma, cercano a la aspiración de la bomba. Las burbujas que se originan en el fluido al entrar en ebullición chocan con las partes móviles de la bomba y estallan, produciendo daños considerables en la máquina, por lo que este fenómeno es indeseable y se ha de procurar evitar.

En la figura B.6 se muestra una representación simplificada de una bomba centrífuga aspirando un fluido, las letras O, A y C hacen referencia a la superficie libre del líquido, la brida de aspiración de la bomba, y el lugar en el interior de la misma donde tiene lugar la cavitación, respectivamente. Usando esta nomenclatura, se denomina NPSHA (*Net Positive Suction Head Available*) a [A4]:

$$NPSHA = \frac{P_O - P_{vapor}}{\rho \cdot g} - (z_A + h_{OA}) \quad (B.33)$$

Se define el NPSHR (*Net Positive Suction Head Required*) como [A4]:

$$NPSHR = h_{AC} + (z_C - z_A) + \frac{v_C^2}{2 \cdot g} \quad (B.34)$$

Siempre que se cumpla que $NPSHA \geq NPSHR$, es decir, que haya más carga "disponible" que "requerida", la cavitación no tendrá lugar.

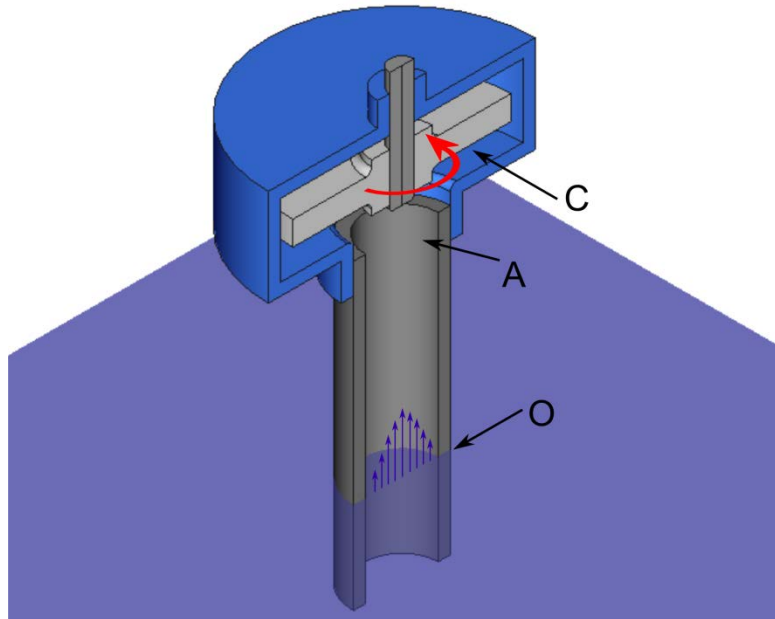


Figura B.6. Rep. simplificada de una bomba aspirando fluido. Fuente: Elaboración propia.

Es común que en las curvas de las bombas que proporcionan los fabricantes se incluya la curva del NPSHR en función del caudal, como es este caso (figura 2.16 de la memoria), por lo que se calcula el NPSHA del caso más desfavorable (el que proporciona un disponible menor, empleando el caudal máximo de operación, 49,3 L/min).

Al no ser conocida y ser considerablemente menor que la presión atmosférica a temperatura ambiente, se desprecia la presión de vapor del electrolito. El tramo de tubería que une el depósito con la aspiración es idéntico en ambas líneas, por lo que no importa para cuál se calcule. Puede verse en la figura B.7 los puntos O y A de una de las líneas de la instalación.

Se considera despreciable la sobrepresión inducida en los depósitos mediante nitrógeno, por lo que la presión en O será la atmosférica. Por su parte, se tiene que determinar la cota de la aspiración de la bomba respecto a la de la superficie libre del depósito. De las dimensiones de la bomba proporcionadas por el fabricante [A5] se conoce la cota (absoluta) de la aspiración de la bomba, y la de la superficie libre de electrolito se puede determinar al conocerse las dimensiones del depósito [A6] y el volumen de fluido.

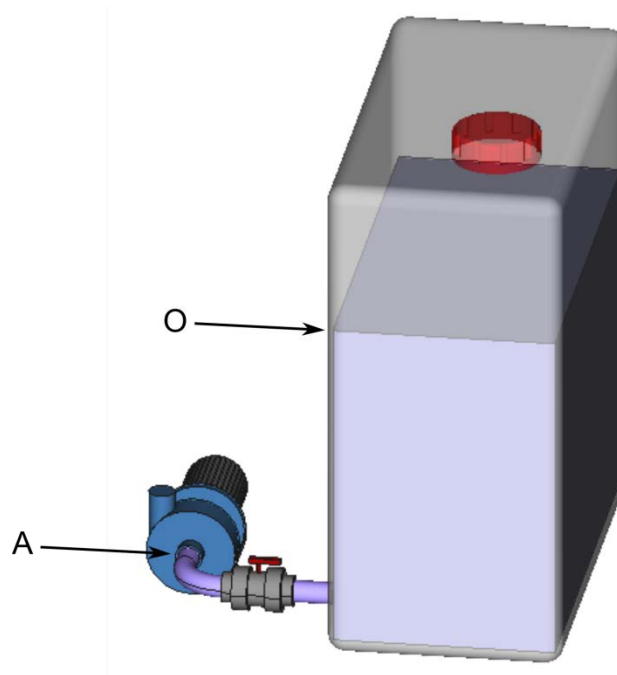


Figura B.7. Línea de bombeo, aspiración y superficie de electrolito. Fuente: Elaboración propia.

Por último, se deben determinar las pérdidas de carga entre O y A, habiendo varias contribuciones:

$$h_{OA} = h_{distribuida} + h_{entrada} + h_{válvula} + h_{codo} \quad (B.35)$$

Se calcula la pérdida de carga distribuida (se estima que la longitud de tubería es 0,4 m) y la local mediante las expresiones B.36 y B.37. Las constantes de pérdidas de entrada, válvula y codo, el factor de fricción para el régimen dado ($Re = 5751$) y los valores de las distintas pérdidas se recogen en la tabla B.8.

$$h_{distribuida} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (B.36)$$

$$h_{elemento} = K_{elemento} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (B.37)$$

Sumando los distintos términos, se tiene que $h_{OA} = 1,27$ cm, $z_A = -51$ cm, y $P_O/(\rho \cdot g) = 10,329$ m (todas las unidades son de columna de agua, ya que las curvas del fabricante se han ensayado con ese fluido), por lo tanto, $NPSHA = 10,83$ m, superior a los aproximadamente 3 m de $NPSHR$ de la bomba al caudal de trabajo ($49,3$ L/min $\cong 3$ m³/h) (figura B.8), por lo que se confirma que no existen problemas de cavitación durante la operación de la batería.

Tabla B.8. Cálculo del NPSHA. Parámetros, valores y resultados.

Parámetro	Valor	
Cota de aspiración	9	cm
Cota de superficie libre de electrolito	60	cm
Factor de fricción f	0,03593	[-]
Constante $K_{entrada}$	0,5	[-]
Constante $K_{válvula}$	0,06	[-]
Constante K_{codo}	0,57	[-]
Pérdidas $h_{distribuida}$	$2,57 \cdot 10^{-3}$	m
Pérdidas $h_{entrada}$	$4,47 \cdot 10^{-3}$	m
Pérdidas $h_{válvula}$	$5,36 \cdot 10^{-4}$	m
Pérdidas h_{codo}	$5,09 \cdot 10^{-3}$	m

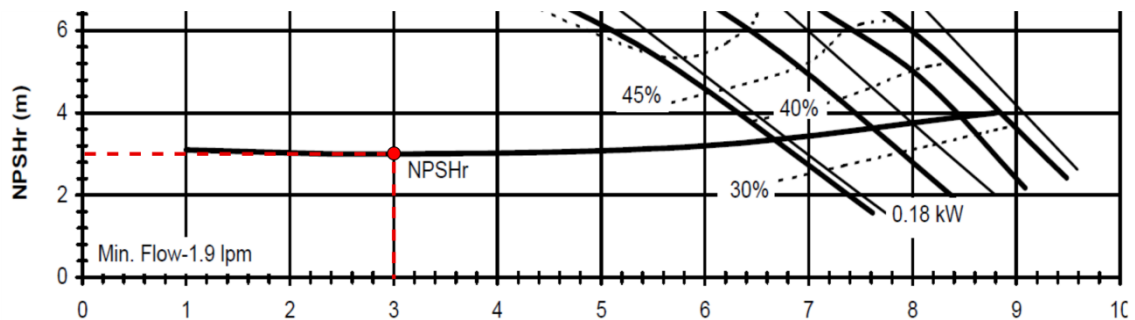


Figura B.8. Curva de NPSHR de la bomba Finish Thompson DB6H. Fuente: [A5].

Hay que tener en cuenta que estas curvas (tanto las de altura proporcionada como las de $NPSHR$) son a un régimen de giro dado, que no será el de trabajo, ya que se regula el caudal mediante variadores de frecuencia que modifican las rpm de las bombas y por tanto sus curvas de funcionamiento. Aún así, teniendo en cuenta que el disponible es considerablemente mayor que el requerido, y la experiencia del grupo de trabajo ubicando las bombas de manera similar a la de este diseño en otros proyectos, se tiene la seguridad de que no se producirá cavitación en la instalación.

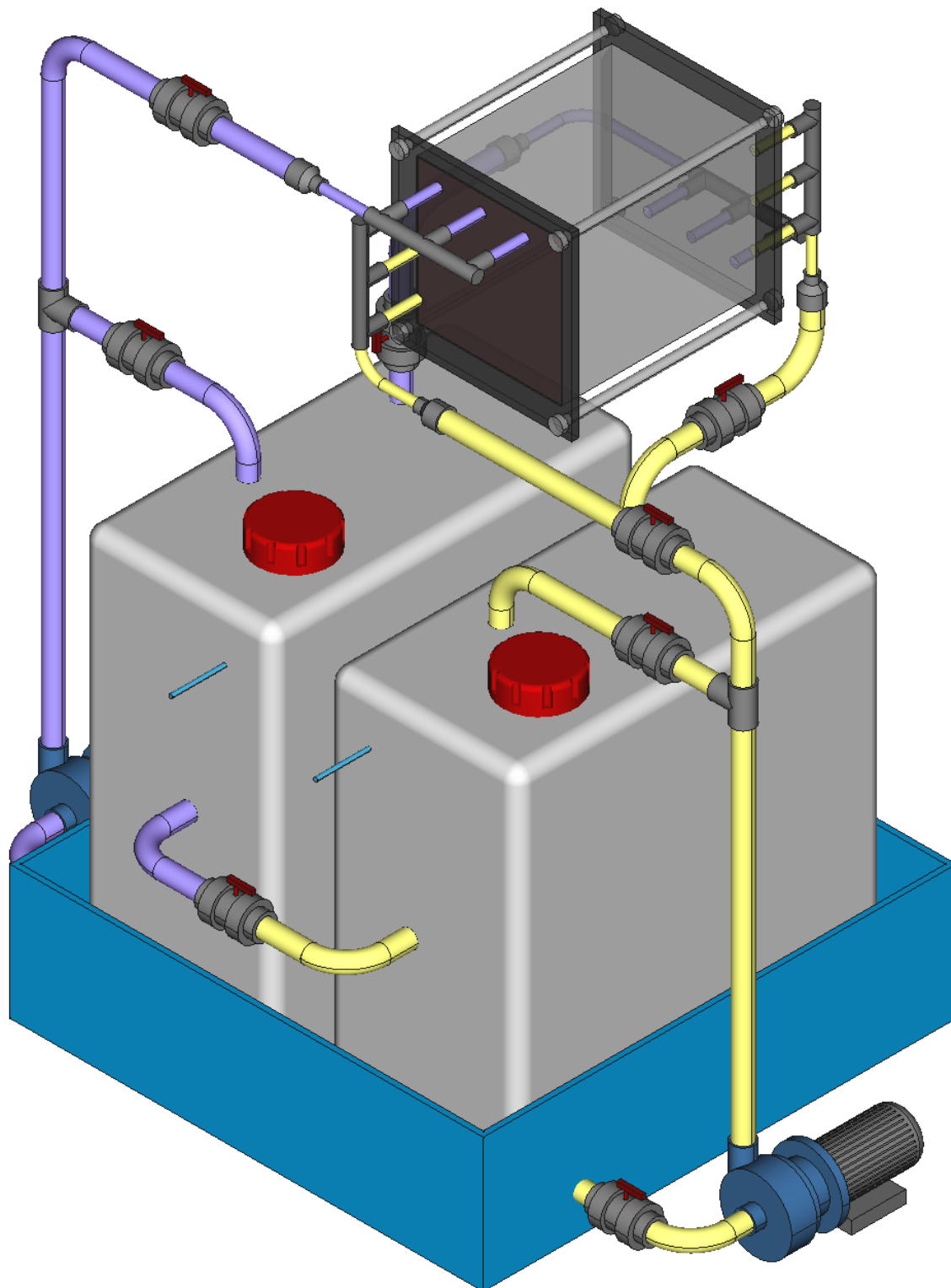
Anexo C. Planos

Para ayudar a la comprensión de la instalación y facilitar su construcción, se incluyen en este anexo diversos planos de la misma, tanto imágenes en perspectiva desde distintos ángulos, como vistas con cotas descriptivas de las dos líneas de bombeo de electrolito, cuantificando algunas de sus dimensiones básicas.

Además, se adjuntan los planos complementarios del rack o armazón sobre el que se colocan los distintos elementos de la batería, un diseño para los colectores divisores de caudal que se instalan a la entrada y salida del *stack*, y unos planos simplificados de un marco de flujo para la RFB.

La ordenación de los distintos planos es la siguiente:

<i>Nº Pieza</i>	<i>Nº Plano</i>	<i>Nombre</i>
1	1	Instalación - Vista 1
1	2	Instalación - Vista 2
1	3	Instalación - Vista 3
2	1	Línea 1 - Frontal
2	2	Línea 1 - Lateral
2	3	Línea 1 - Superior
3	1	Línea 2 - Frontal
3	2	Línea 2 - Lateral
3	3	Línea 2 - Superior
4	1	Armazón
4	2	Forjado Inferior
4	3	Forjado Superior
5	1	Divisor de Caudal
6	1	Marco de Flujo



AUTOR:
ÁLVARO IBÁÑEZ CASAO

INSTALACIÓN- VISTA 1



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura**
Universidad Zaragoza

Nº PIEZA:
1

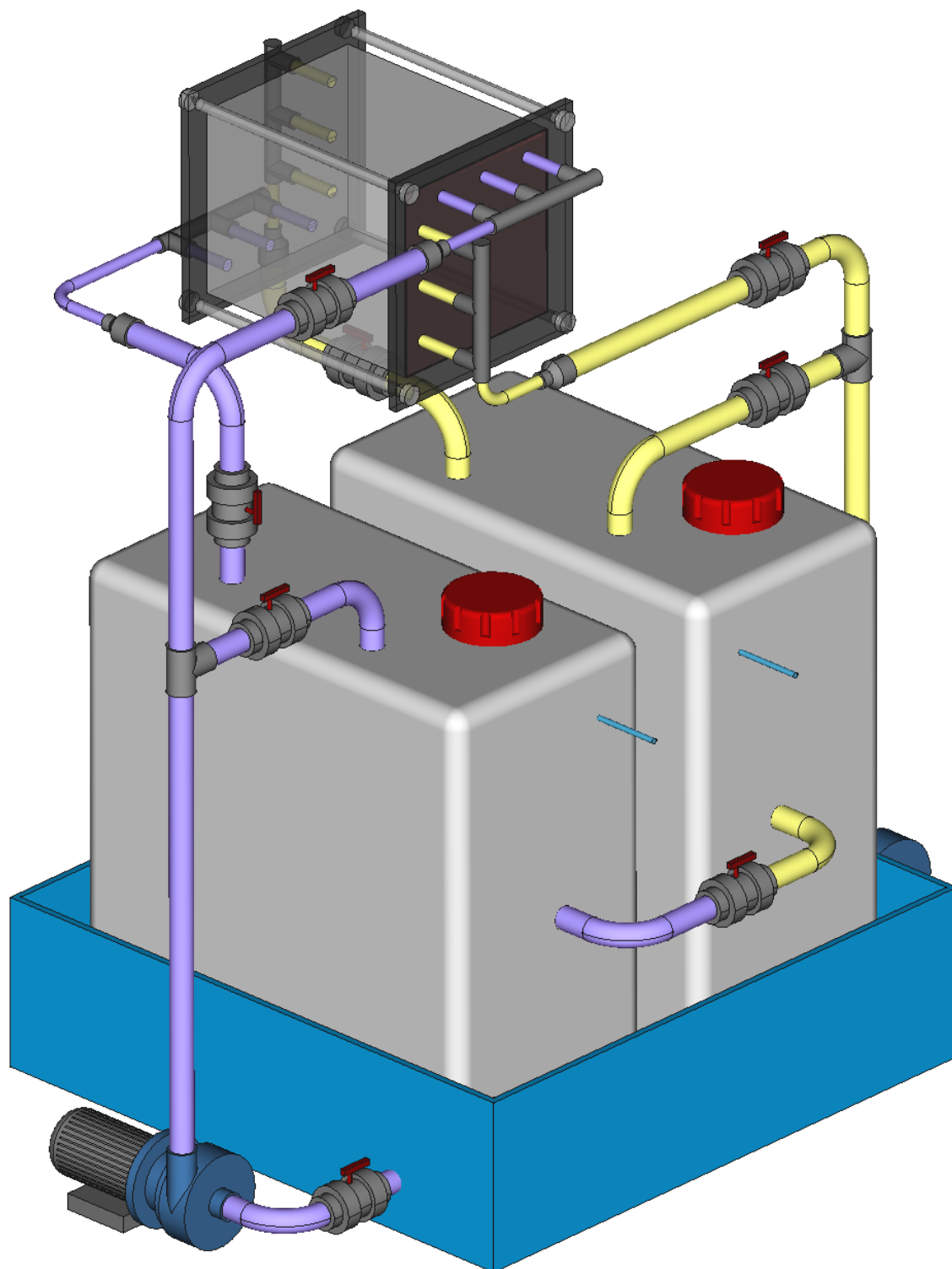
Nº PLANO:
1

ESCALA:
S.E.

TITULACIÓN:
G. EN INGENIERÍA MECÁNICA

FECHA:
28-12-2019





AUTOR:
ÁLVARO IBÁÑEZ CASAO

INSTALACIÓN- VISTA 2



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura**
Universidad Zaragoza

Nº PIEZA:
1

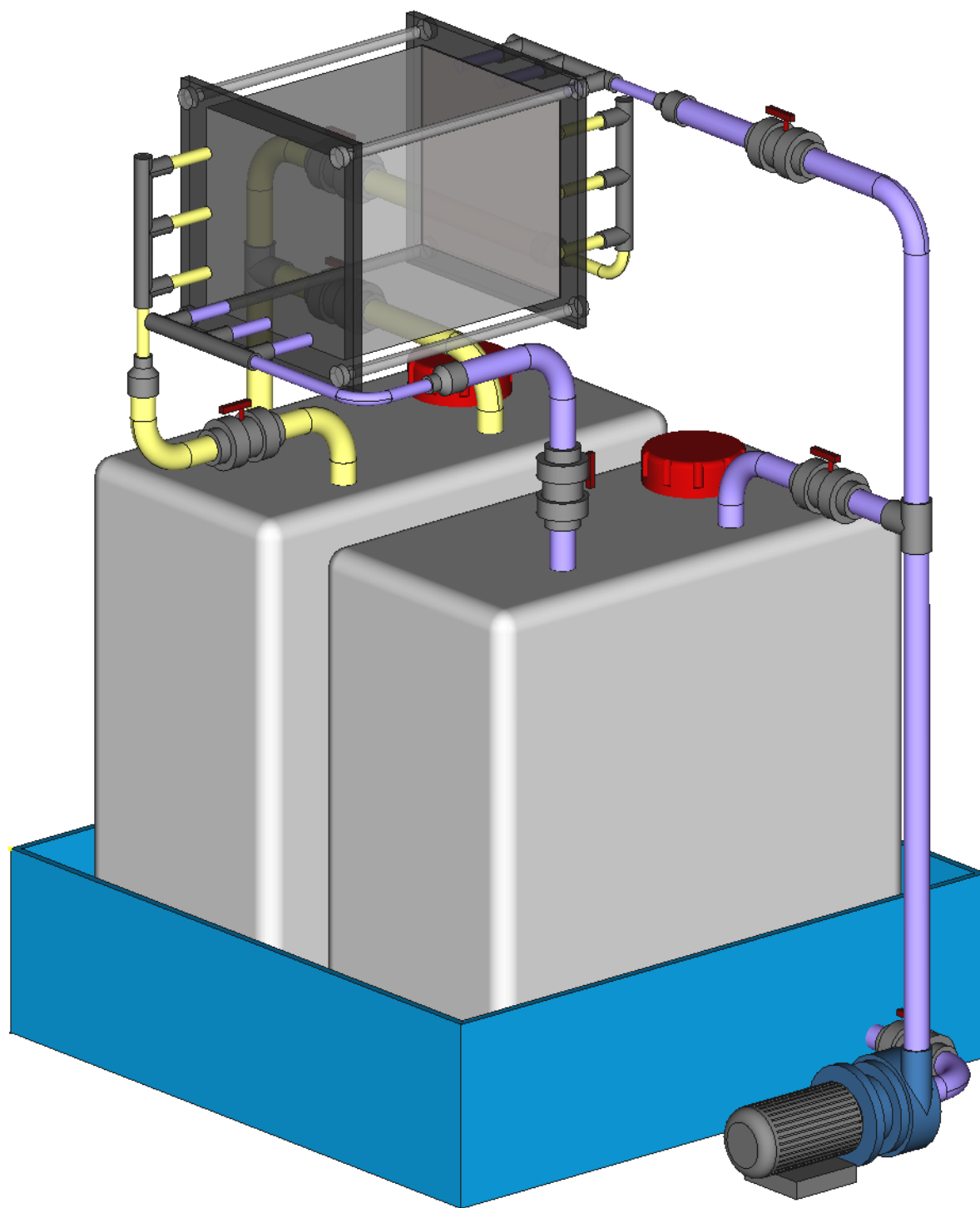
Nº PLANO:
2

ESCALA:
S.E.

TITULACIÓN:
G. EN INGENIERÍA MECÁNICA

FECHA:
28-12-2019





AUTOR:
ÁLVARO IBÁÑEZ CASAO

INSTALACIÓN- VISTA 3



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza**

Nº PIEZA:
1

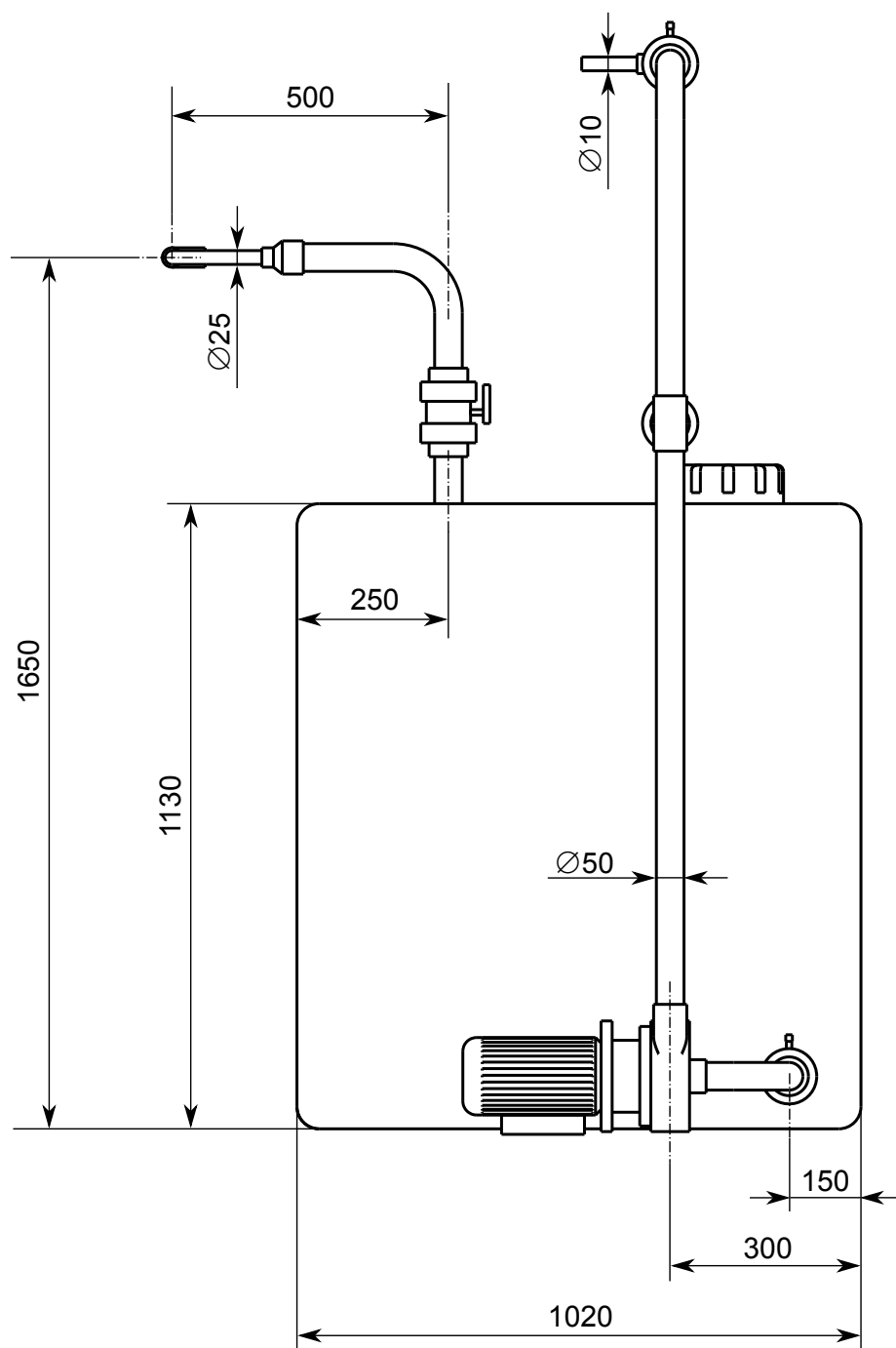
Nº PLANO:
3

ESCALA:
S.E.

TITULACIÓN:
G. EN INGENIERÍA MECÁNICA

FECHA:
28-12-2019





AUTOR:
ÁLVARO IBÁÑEZ CASAO

LÍNEA 1- LATERAL



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura**
Universidad Zaragoza

Nº PIEZA:
2

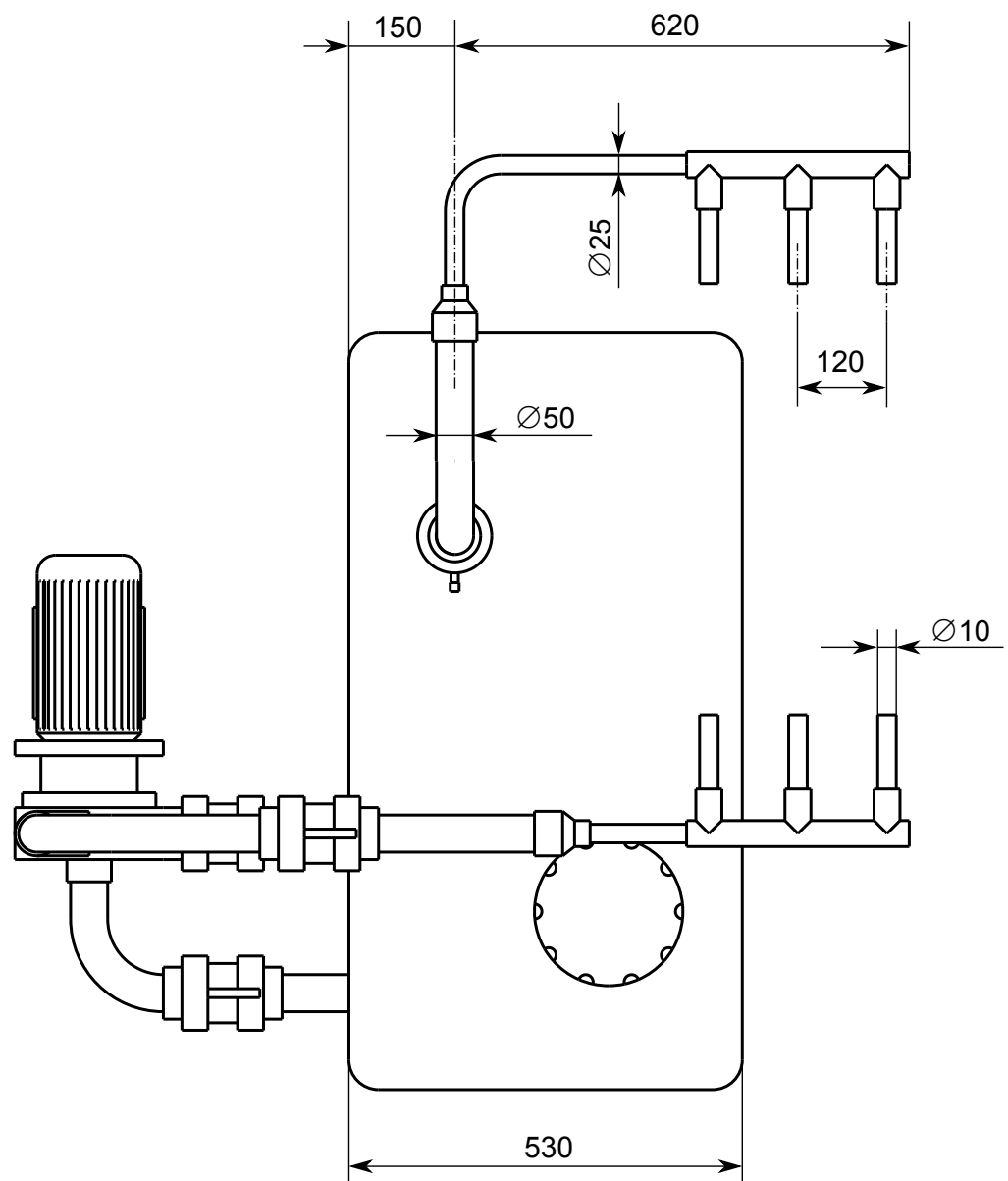
Nº PLANO:
2

ESCALA:
S.E.

TITULACIÓN:
G. EN INGENIERÍA MECÁNICA

FECHA:
28-12-2019





AUTOR:
ÁLVARO IBÁÑEZ CASAO

LÍNEA 1- SUPERIOR



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura**
Universidad Zaragoza

Nº PIEZA:
2

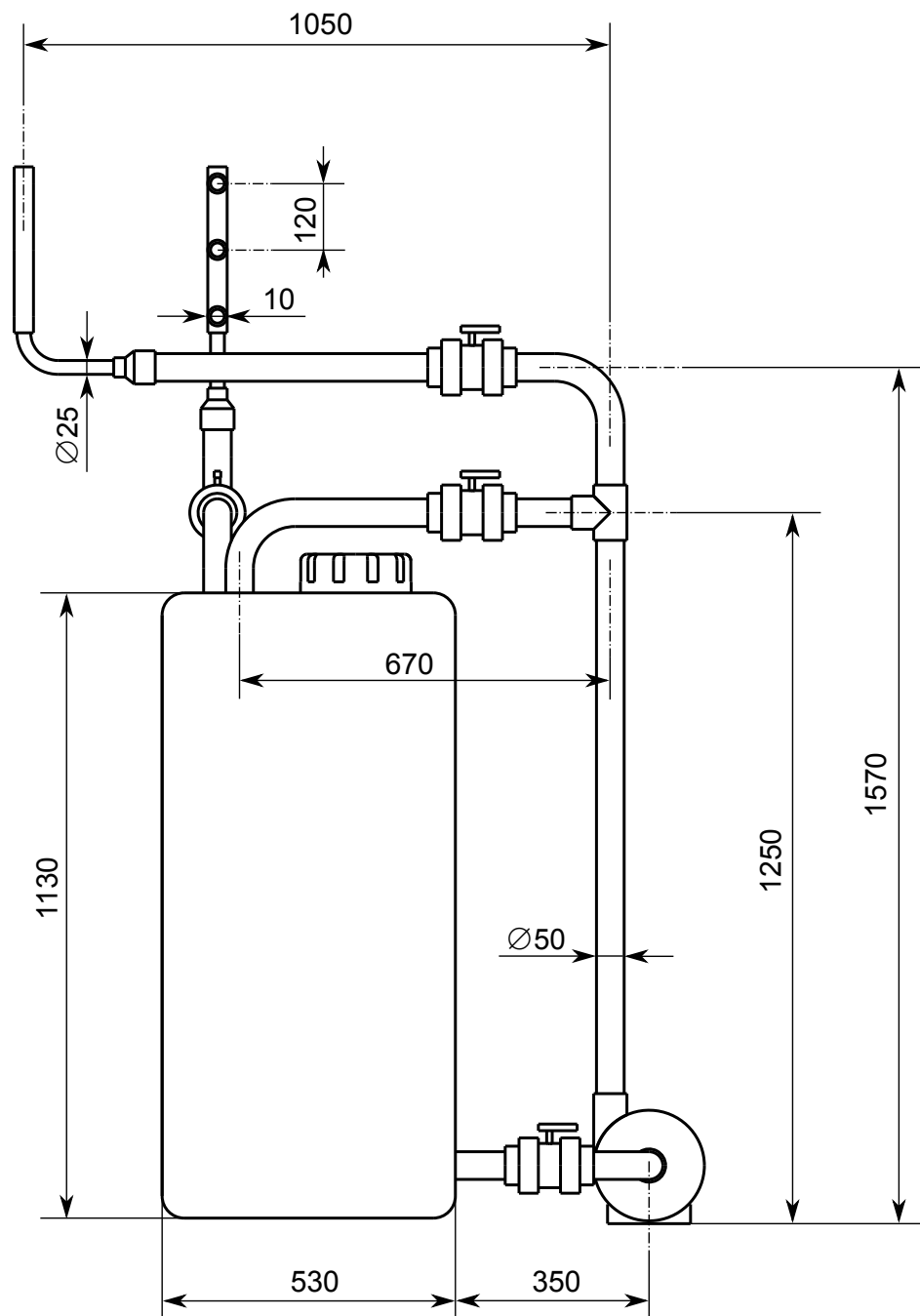
Nº PLANO:
3

ESCALA:
S.E.

TITULACIÓN:
G. EN INGENIERÍA MECÁNICA

FECHA:
28-12-2019





AUTOR:
ÁLVARO IBÁÑEZ CASAO

LÍNEA 2- FRONTAL



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura**
Universidad Zaragoza

Nº PIEZA:
3

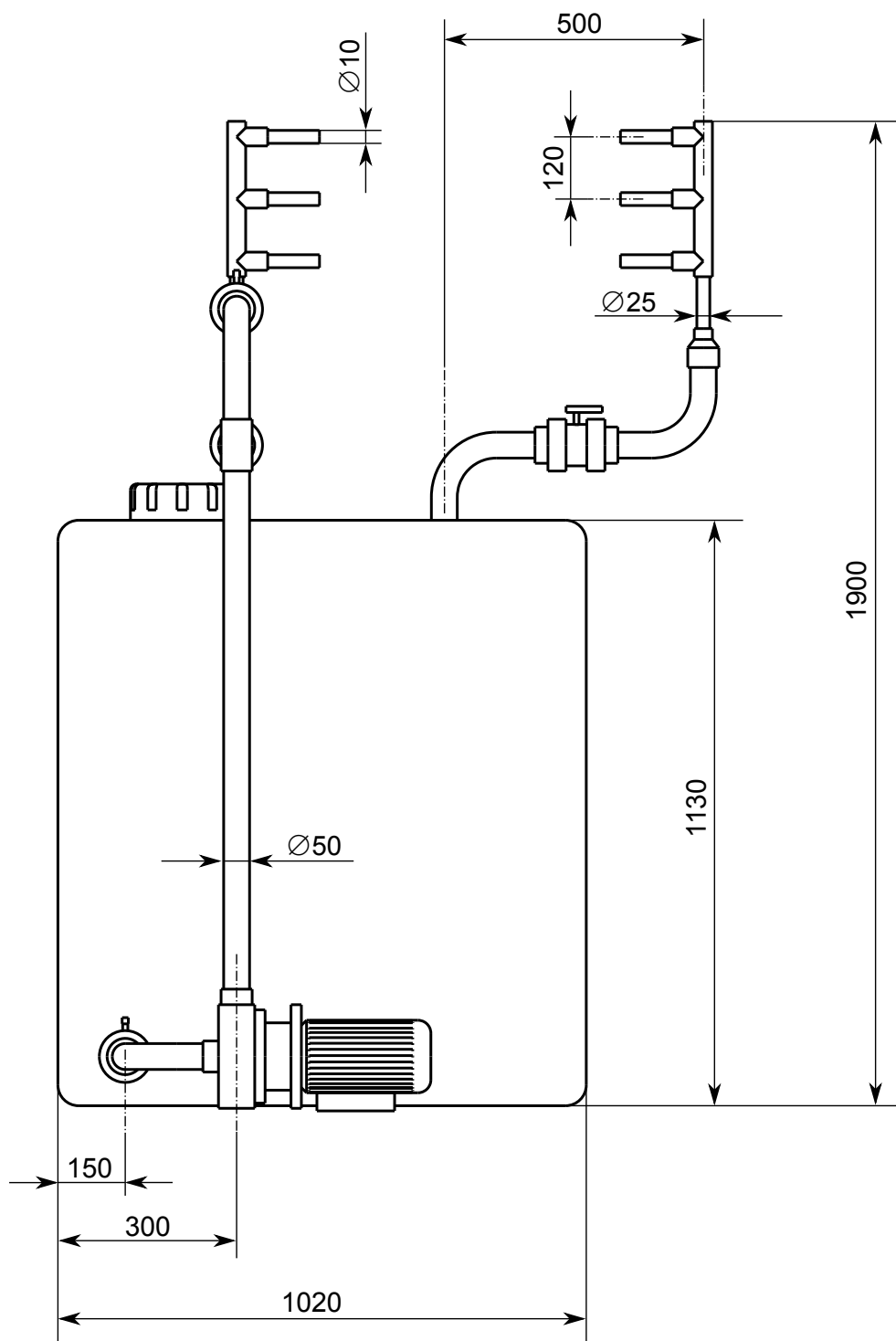
Nº PLANO:
1

ESCALA:
S.E.

TITULACIÓN:
G. EN INGENIERÍA MECÁNICA

FECHA:
28-12-2019





AUTOR:
ÁLVARO IBÁÑEZ CASAO

LÍNEA 2- LATERAL



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura**
Universidad Zaragoza

Nº PIEZA:
3

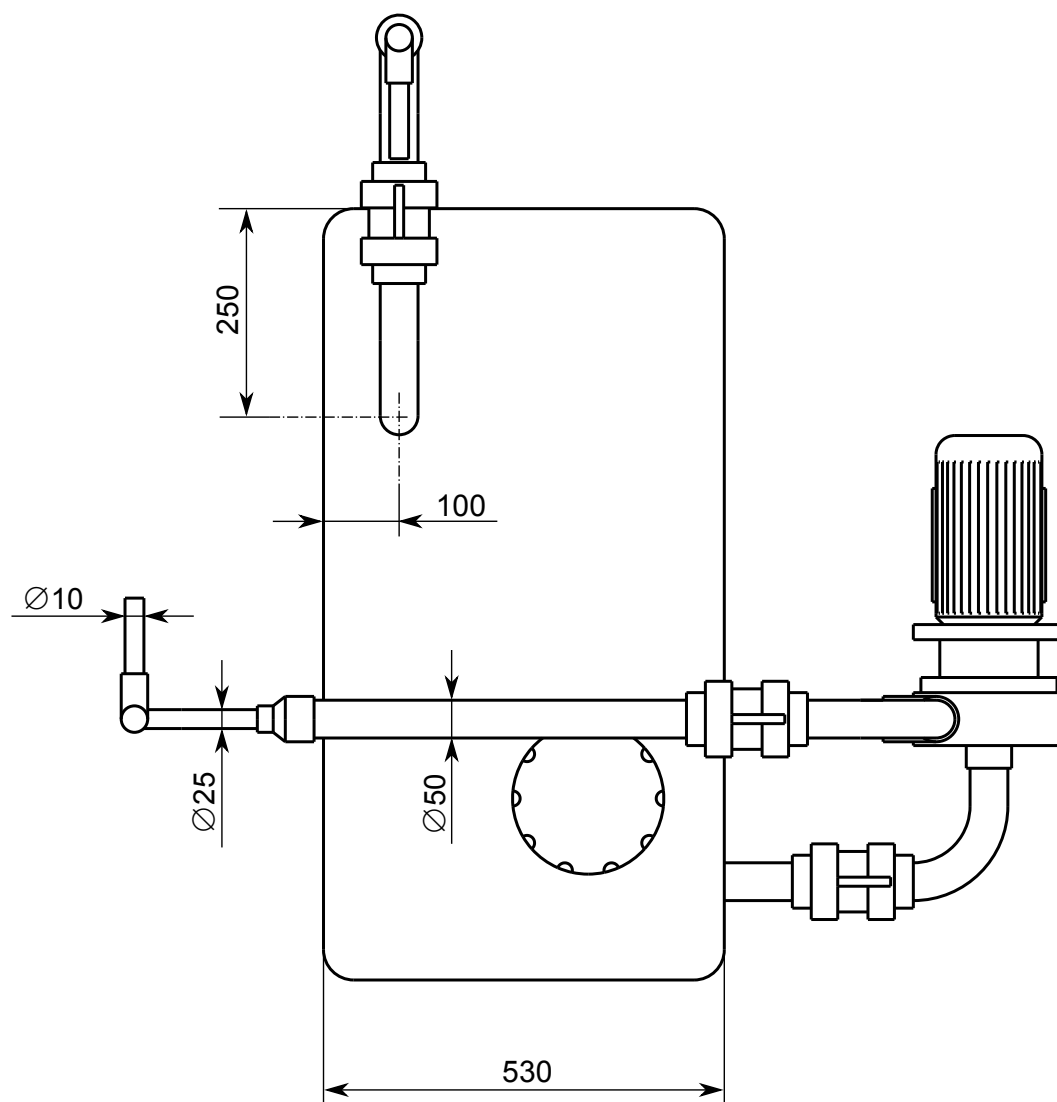
Nº PLANO:
2

ESCALA:
S.E.

TITULACIÓN:
G. EN INGENIERÍA MECÁNICA

FECHA:
28-12-2019





AUTOR:
ÁLVARO IBÁÑEZ CASAO

LÍNEA 2- SUPERIOR



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura**
Universidad Zaragoza

Nº PIEZA:
3

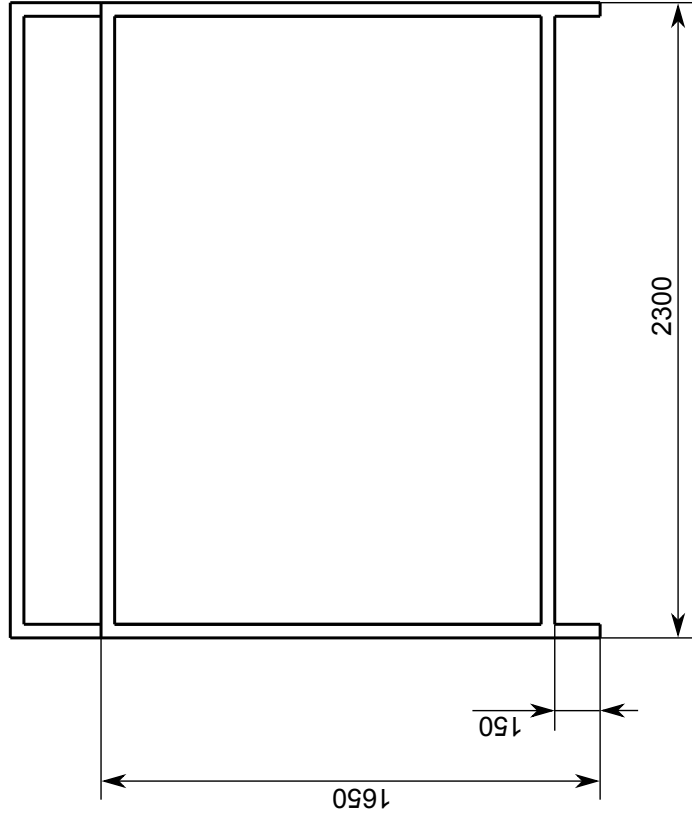
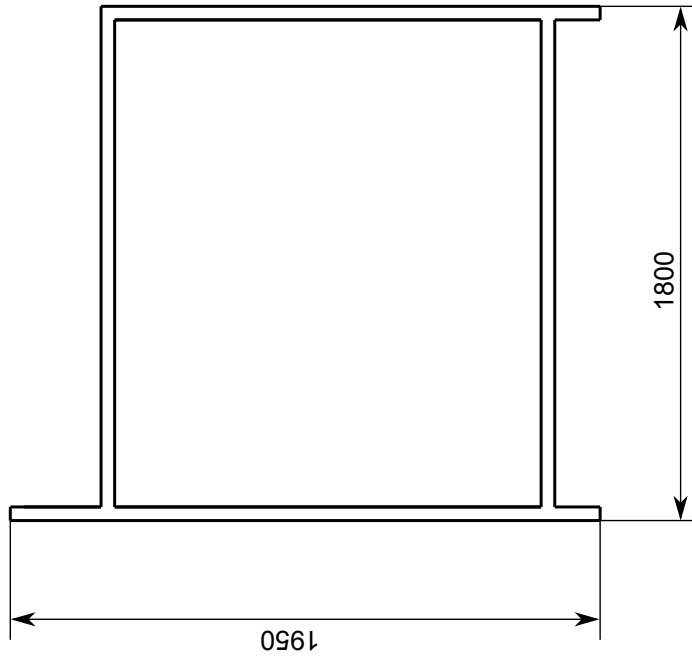
Nº PLANO:
3

ESCALA:
S.E.

TITULACIÓN:
G. EN INGENIERÍA MECÁNICA

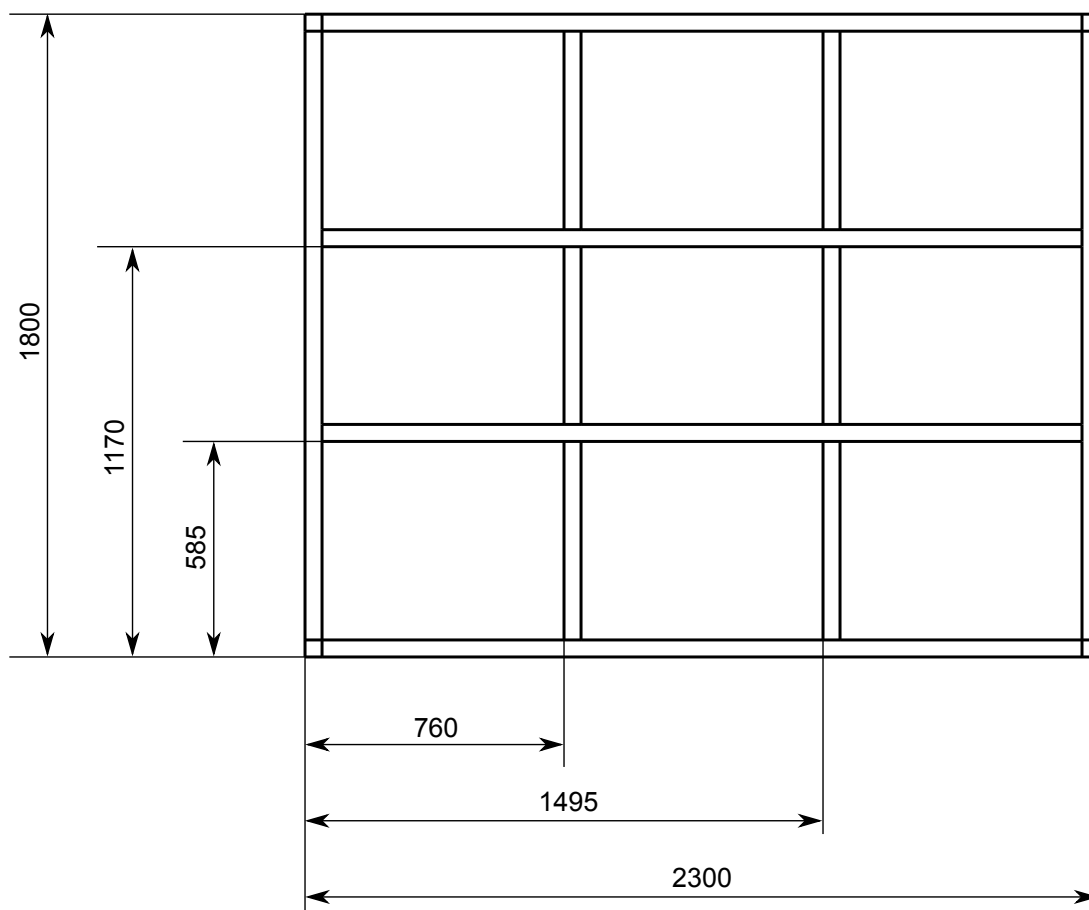
FECHA:
28-12-2019





La sección de los perfiles es 45x45 mm.

AUTOR: ÁLVARO IBÁÑEZ CASAO		ARMAZÓN		
<div><div>Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad Zaragoza</div></div>				
Nº PIEZA: 4		Nº PLANO: 1		ESCALA: S.E.
TITULACIÓN: G. EN INGENIERÍA MECÁNICA				
FECHA: 28-12-2019		 LIFTEC		



La sección de los perfiles es 45x45 mm.

AUTOR:
ÁLVARO IBÁÑEZ CASAO

FORJADO INFERIOR



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura**
Universidad Zaragoza

Nº PIEZA:
4

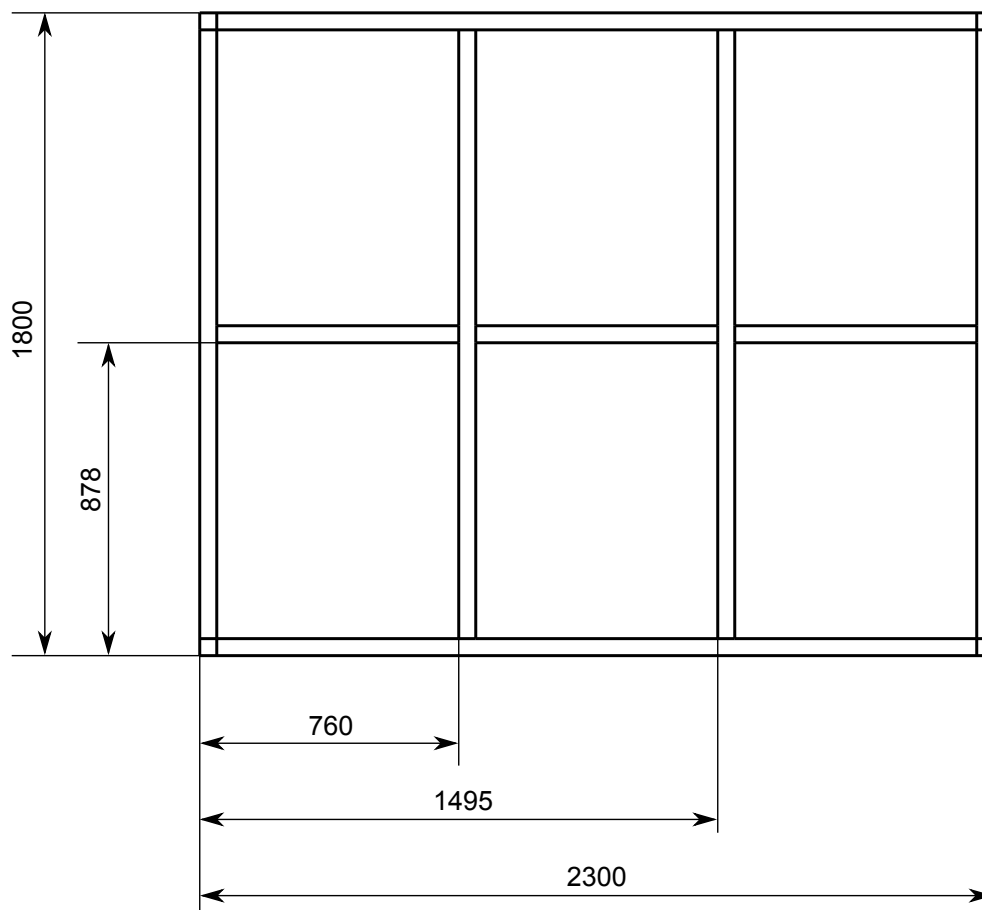
Nº PLANO:
2

ESCALA:
S.E.

TITULACIÓN:
G. EN INGENIERÍA MECÁNICA

FECHA:
28-12-2019





La sección de los perfiles es 45x45 mm.

AUTOR:
ÁLVARO IBÁÑEZ CASAO

FORJADO SUPERIOR



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura**
Universidad Zaragoza

Nº PIEZA:
4

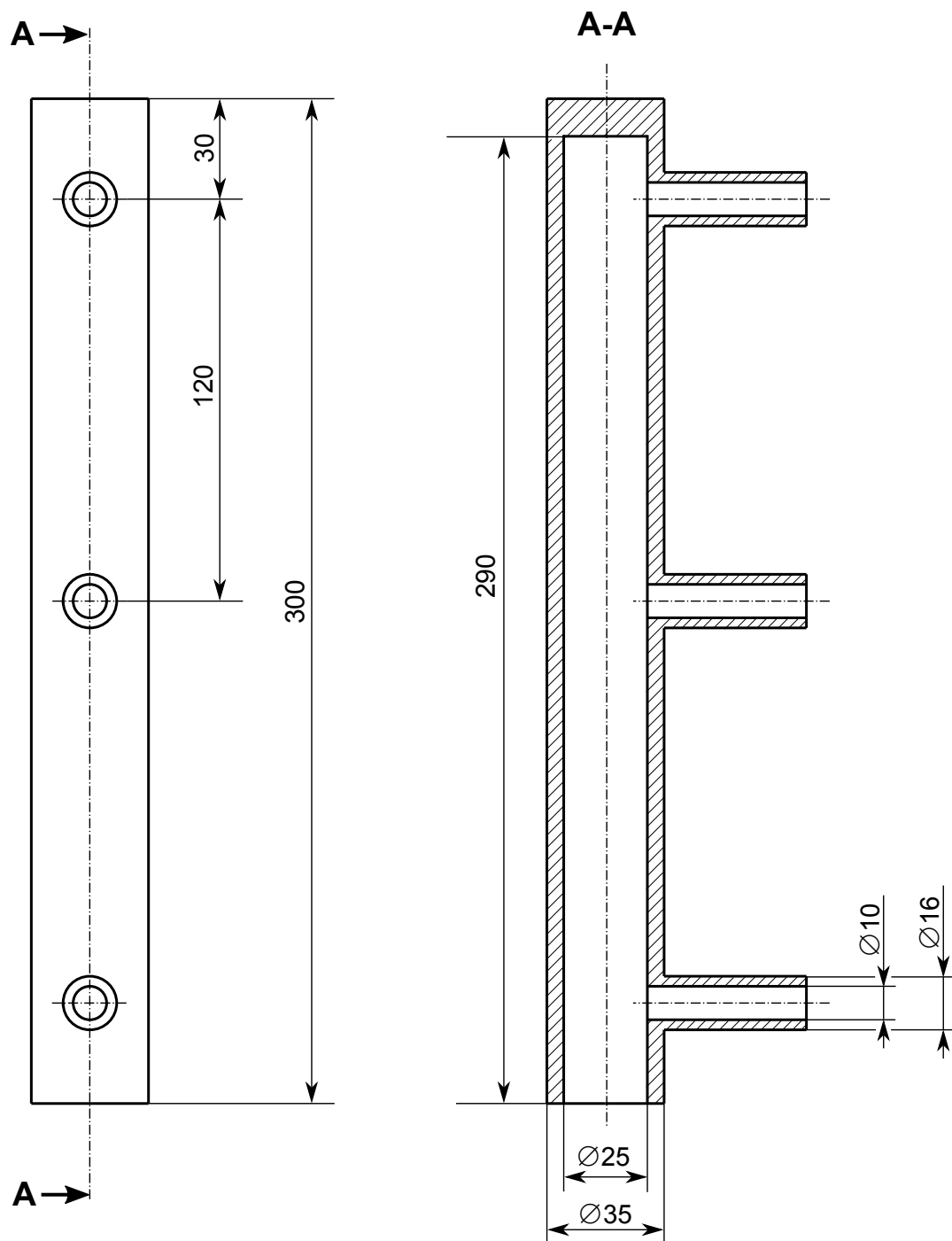
Nº PLANO:
3

ESCALA:
S.E.

TITULACIÓN:
G. EN INGENIERÍA MECÁNICA

FECHA:
28-12-2019





AUTOR:
ÁLVARO IBÁÑEZ CASAO

DIVISOR DE CAUDAL



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura**
Universidad Zaragoza

Nº PIEZA:
5

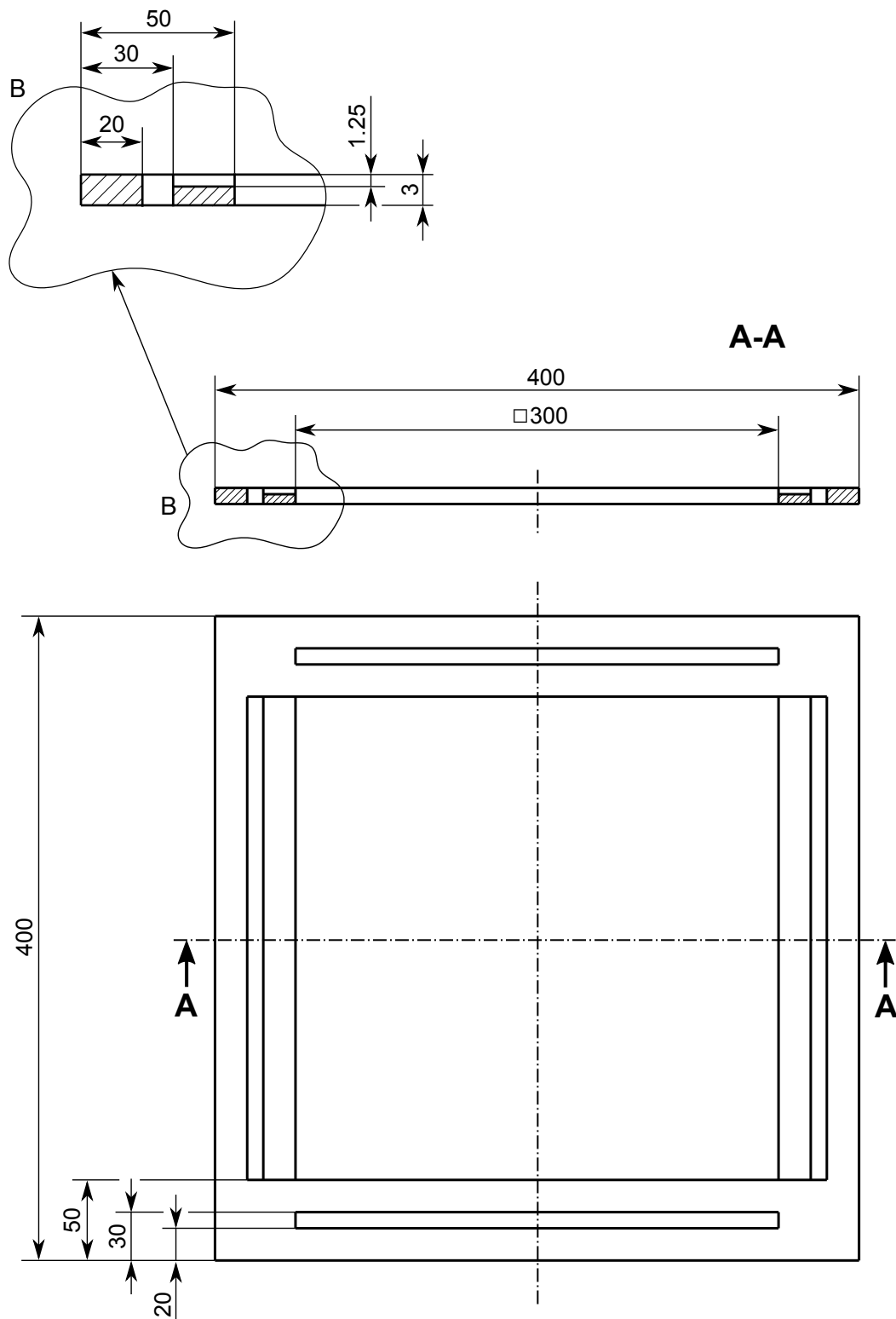
Nº PLANO:
1

ESCALA:
S.E.

TITULACIÓN:
G. EN INGENIERÍA MECÁNICA

FECHA:
28-12-2019





AUTOR:
ÁLVARO IBÁÑEZ CASAO

MARCO DE FLUJO



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura**
Universidad Zaragoza

Nº PIEZA:
6

Nº PLANO:
1

ESCALA:
S.E.

TITULACIÓN:
G. EN INGENIERÍA MECÁNICA

FECHA:
28-12-2019



Anexo D. Información complementaria sobre seguridad

El manejo y almacenamiento de sustancias químicas conlleva una serie de riesgos según la naturaleza de las mismas (inflamabilidad, toxicidad...). Los distribuidores de compuestos químicos adjuntan, además de la identificación pertinente de la sustancia (número CAS), un documento con sus especificaciones, desde propiedades físicas, hasta riesgos para la salud, pasando por medidas en caso de vertido, etc.

Los sulfatos de vanadio (especies que se formarán en los electrolitos) no son comerciales en todos sus estados de oxidación en estado sólido, debido a la menor estabilidad con respecto a otras sales como los cloruros. Así, las hojas de seguridad (SDS) de los compuestos generados en los electrolitos no están disponibles o son poco completas, por lo que se ha optado por buscar las especificaciones de los cloruros de vanadio análogos, de similares propiedades químicas. En las hojas de seguridad de los cloruros de vanadio se cita el riesgo de formación de gases Cl_2 y HCl que no serían relevantes para la instalación de la batería ya que no existe el ion cloruro.

En la tabla D.1 se adjuntan los números CAS, referencia del distribuidor y de su hoja de especificaciones de los ácidos y las especies de vanadio que se forman en los electrolitos. Sin embargo, de todas ellas, las más corrosivas y peligrosas son el ácido sulfúrico y las especies de vanadio en estado de oxidación 5+, tal y como se especifica en el informe *Vanadium Pentoxide and Other Inorganic Vanadium Compounds* publicado por la Organización Mundial de la Salud [A7]. Para estas especies se agrega en este anexo información de interés extraída de sus respectivas hojas de especificaciones.

Tabla D.1. Especies que forman los electrolitos. Identificación y hojas de especificaciones.

Especie	Formulación	Número CAS	Ref. Distribuidor	Hoja de especificaciones
Ácido sulfúrico	H_2SO_4	7664-93-9	131058 ^a	[A8]
Ácido fosfórico	H_3PO_4	7664-38-2	141032 ^a	[A9]
Cloruro de vanadio (II)	VCl_2	10580-52-6	422371 ^b	[A10]
Cloruro de vanadio (III)	VCl_3	7718-98-1	208272 ^b	[A11]
Cloruro de vanadio (IV)	VCl_4	7632-51-1	366617 ^b	[A12]
Oxiclорuro de vanadio (V)	$VOCl_3$	7727-18-6	200891 ^b	[A13]

Distribuido por: ^a: Sigma Aldrich [A14]. ^b: PanReac [A15].



D.1. Ácido sulfúrico

1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1. Identificador del producto

Denominación: Ácido sulfúrico 93-98%

4. Primeros auxilios

4.1. Descripción de los primeros auxilios

En caso de pérdida del conocimiento nunca dar a beber ni provocar el vómito.

4.2. Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

No existen más datos relevantes disponibles.

4.3. Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

- Ingestión:

Beber agua abundante. Evitar el vómito (existe riesgo de perforación). Pedir inmediatamente atención médica. No neutralizar.

- Inhalación:

Trasladar a la persona al aire libre. En caso de que persista el malestar, pedir atención médica.

- Contacto con la piel:

Lavar abundantemente con agua. Quitarse las ropas contaminadas. Extraer el producto con un algodón impregnado en polietilenglicol 400.

- Ojos:

Lavar con agua abundante (mínimo durante 15 minutos), manteniendo los párpados abiertos. Pedir atención médica.

5. Medidas de lucha contra incendios

5.1. Medios de extinción:

Los apropiados al entorno.



5.2. Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla

Incombustible. En caso de incendio pueden formarse vapores tóxicos de SO_x . En contacto con metales puede formarse hidrógeno gaseoso (existe riesgo de explosión).

5.3. Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

Ropa y calzado adecuados. Equipo de respiración autónomo.

6. Medidas en caso de vertido accidental

6.1. Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia

No inhalar los vapores. Evitar el contacto con la piel, los ojos y la ropa. Procurar una ventilación apropiada.

6.2. Precauciones relativas al medio ambiente

No permitir el paso al sistema de desagües. Evitar la contaminación del suelo, aguas y desagües.

6.3. Métodos y material de contención y de limpieza

Recoger con materiales absorbentes (Absorbente General Panreac, Kieselguhr, etc.) o en su defecto arena o tierra seca y depositar en contenedores para residuos para su posterior eliminación de acuerdo con las normativas vigentes. Limpiar los restos con agua abundante. Neutralizar con sodio hidróxido diluido.

7. Manipulación y almacenamiento

7.1. Precauciones para una manipulación segura

Sin indicaciones particulares.

7.2. Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades

Recipientes bien cerrados. En local bien ventilado.

Temperatura de almacenamiento recomendada: Temperatura ambiente. No almacenar en recipientes metálicos.

8. Controles de exposición/protección individual

8.1. Parámetros de control

VLA-EC: 3 mg/m^3 VLA-ED (España): 1 mg/m^3 VLA-ED (Italia): $0,05 \text{ mg/m}^3$.



8.2. Controles de la exposición

Asegurar una buena ventilación y renovación de aire del local.

- Protección respiratoria:

En caso de formarse vapores/aerosoles, usar equipo respiratorio adecuado.

Filtro P.

- Protección de las manos:

Usar guantes apropiados (neopreno, PVC).

- Protección de los ojos/la cara:

Usar gafas de seguridad.

- Medidas de higiene particulares:

Quitarse las ropas contaminadas. Usar ropa de trabajo adecuada. Lavarse manos y cara antes de las pausas y al finalizar el trabajo.

- Control de la exposición medioambiental:

Cumplir con la legislación local vigente sobre protección del medio ambiente.

D.2. Oxidocloruro de vanadio (V)

1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1. Identificadores del producto

Nombre del producto: Vanadium (V) oxychloride.

Referencia: 200891.

Marca: Aldrich.

Nº CAS: 7727-18-6.

4. Primeros auxilios

4.1. Descripción de los primeros auxilios

- Recomendaciones generales:

Consultar a un médico. Mostrar esta ficha de seguridad al doctor que esté de servicio.



- Si es inhalado:

Si aspiró, mueva la persona al aire fresco. Si ha parado de respirar, hacer la respiración artificial. Consultar a un médico.

- En caso de contacto con la piel:

Quítese inmediatamente la ropa y zapatos contaminados. Eliminar lavando con jabón y mucha agua. Llevar al afectado en seguida a un hospital. Consultar a un médico.

- En caso de contacto con los ojos:

Lávese a fondo con agua abundante durante 15 minutos por lo menos y consulte al médico.

- Por ingestión:

No provocar el vómito. Nunca debe administrarse nada por la boca a una persona inconsciente. Enjuague la boca con agua. Consultar a un médico.

4.2. Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

Los síntomas y efectos más importantes conocidos se describen en la etiqueta.

4.3. Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deben dispensarse inmediatamente

Sin datos disponibles.

5. Medidas de lucha contra incendios

5.1. medios de extinción

Medio de extinción apropiado: polvo seco.

5.2. Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla

Gas cloruro de hidrógeno (no relevante en esta instalación), óxidos de vanadio/vanadio no combustible.

5.3. Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

Si es necesario, usar equipo de respiración autónomo para la lucha contra el fuego.



6. Medidas en caso de vertido accidental

6.1. Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia

Usar protección respiratoria. Evitar respirar los vapores, la neblina o el gas. Asegúrese una ventilación apropiada. Evacuar el personal a zonas seguras. Equipo de protección individual, ver sección 8.

6.2. Precauciones relativas al medio ambiente

Impedir nuevos escapes o derrames si puede hacerse sin riesgos. No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado.

6.3. Métodos y material de contención y de limpieza

Empapar con material absorbente inerte y eliminar como un desecho especial. No limpiar con agua. Guardar en contenedores apropiados y cerrados para su eliminación.

6.4. Referencia a otras secciones

Para eliminación de desechos ver sección 13.

7. Manipulación y almacenamiento

7.1. Precauciones para una manipulación segura

Evítese el contacto con los ojos y la piel. Evitar la inhalación de vapor o neblina. Ver precauciones en la sección 2.2.

7.2. Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades

Almacenar en un lugar fresco. Conservar el envase herméticamente cerrado en un lugar seco y bien ventilado. Los contenedores que se abren deben volverse a cerrar cuidadosamente y mantener en posición vertical para evitar pérdidas. Se recomienda que el producto no tenga contacto con agua durante su almacenamiento.

7.3. Usos específicos finales

Aparte de los usos mencionados en la sección 1.2. no se estipulan otros usos específicos.

8. Controles de exposición/protección individual

8.1. Parámetros de control

Componentes con valores límite ambientales de exposición profesional: no contiene sustancias con valores límites de exposición profesional.



8.2. Controles de la exposición

Controles técnicos adecuados: evitar el contacto con la piel, ojos y ropa. Lávense las manos antes de los descansos e inmediatamente después de manipular la sustancia.

Protección personal.

- *Protección de los ojos/la cara:*

Gafas de seguridad ajustadas al contorno del rostro. Visera protectora (mínimo 20 cm). Use equipo de protección para los ojos probado y aprobado según las normas gubernamentales correspondientes, tales como NIOSH (EE.UU) o EN 166 (UE).

- *Protección de la piel:*

Manipular con guantes. Los guantes deben ser inspeccionados antes de su uso. Utilice la técnica correcta de quitarse los guantes (sin tocar la superficie exterior del guante) para evitar el contacto de la piel con este producto. Deseche los guantes contaminados después de su uso, de conformidad con las leyes aplicables y buenas prácticas de laboratorio. Lavar y secar las manos. Los guantes de protección seleccionados deben cumplir con las especificaciones del Reglamento (UE) 2016/425 y de la norma EN 374 derivada del mismo.

- *Protección corporal:*

Traje de protección completo contra productos químicos, ropa protectora retardante a la llama, el tipo de equipamiento de protección debe ser elegido según la concentración y la cantidad de sustancia peligrosa al lugar específico de trabajo.

- *Protección respiratoria:*

Donde el asesoramiento de riesgo muestre que los respiradores purificadores toda la cara con combinación multi-propósito (EE.UU) o tipo ABEK (EN 14387 ingeniería). Usar respiradores y componentes testados y aprobados bajo los estándares gubernamentales apropiados como NIOSH (EE.UU) o CEN (UE).

- *Control de exposición ambiental:*

Impedir nuevos escapes o derrames si puede hacerse sin riesgos. No dejar que el producto entre en el alcantarillado.

13. Consideraciones relativas a la eliminación

13.1. Métodos para el tratamiento de residuos

- *Producto:*

Ofertar el sobrante y las soluciones no aprovechables a una compañía de vertidos acreditada.

- *Envases contaminados:*

Eliminar como producto no usado.



15. Información reglamentaria

15.1. Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla

La hoja técnica de seguridad cumple con los requisitos del Reglamento (CE) Nº 1907/2006. REACH - Restricciones a la fabricación, comercialización y uso de determinadas sustancias, preparados y artículos peligrosos (Anexo XVII).

En la instalación podría llegar a formarse hidrógeno gas H_2 , por lo que también se adjunta parte de su hoja de especificaciones a continuación [A16].

D.3. Hidrógeno

1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1. Identificadores del producto

Nombre del producto: Hydrogen.

Referencia: 295396.

Marca: Aldrich.

Nº CAS: 1333-74-0.

4. Primeros auxilios

4.1. Descripción de los primeros auxilios

- *Recomendaciones generales:*

Consultar a un médico. Mostrar esta ficha de seguridad al doctor que esté de servicio.

- *Si es inhalado:*

Si aspiró, mueva la persona al aire fresco. Si ha parado de respirar, hacer la respiración artificial. Consultar a un médico.

- *En caso de contacto con la piel:*

Eliminar lavando con jabón y mucha agua. Consultar a un médico.

- *En caso de contacto con los ojos:*

Lavarse abundantemente los ojos con agua como medida de precaución.



- *Por ingestión:*

No provocar el vómito. Nunca debe administrarse nada por la boca a una persona inconsciente. Enjuague la boca con agua. Consultar a un médico.

4.2. Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

Los síntomas y efectos más importantes conocidos se describen en la etiqueta.

4.3. Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deben dispensarse inmediatamente

Sin datos disponibles.

5. Medidas de lucha contra incendios

5.1. medios de extinción

Medio de extinción apropiado: Usar agua pulverizada, espuma resistente al alcohol, polvo seco o dióxido de carbono.

5.3. Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

Si es necesario, usar equipo de respiración autónomo para la lucha contra el fuego.

5.4. Otros datos

El agua pulverizada puede ser utilizada para enfriar los contenedores cerrados.

6. Medidas en caso de vertido accidental

6.1. Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia

Evitar respirar los vapores, la neblina o el gas. Asegúrese una ventilación apropiada. Retirar todas las fuentes de ignición. Evacuar el personal a zonas seguras. Tener cuidado con los vapores que se acumulan formando así concentraciones explosivas. Los vapores pueden acumularse en las zonas inferiores. Equipo de protección individual, ver sección 8.

6.2. Precauciones relativas al medio ambiente

Impedir nuevos escapes o derrames si puede hacerse sin riesgos. No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado.

6.3. Métodos y material de contención y de limpieza

Recoger inmediatamente barriendo o con aspiradora.



6.4. Referencia a otras secciones

Para eliminación de desechos ver sección 13.

7. Manipulación y almacenamiento

7.1. Precauciones para una manipulación segura

Evitar la inhalación de vapor o neblina. Conservar alejado de toda llama o fuente de chispas - no fumar. Tomar medidas para impedir la acumulación de descargas electrostáticas. Ver precauciones en la sección 2.2.

7.2. Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades

Almacenar en un lugar fresco. Conservar el envase herméticamente cerrado en un lugar seco y bien ventilado. Contenidos bajo presión.

7.3. Usos específicos finales

Aparte de los usos mencionados en la sección 1.2. no se estipulan otros usos específicos.

8. Controles de exposición/protección individual

8.1. Parámetros de control

Componentes con valores límite ambientales de exposición profesional: no contiene sustancias con valores límites de exposición profesional.

8.2. Controles de la exposición

Manipular con las precauciones de higiene industrial adecuadas, y respetar las prácticas de seguridad. Lávense las manos antes de los descansos e inmediatamente después de manipular la sustancia.

Protección personal.

- *Protección de los ojos/la cara:*

Caretas de protección y gafas de seguridad. Use equipo de protección para los ojos probado y aprobado según las normas gubernamentales correspondientes, tales como NIOSH (EE. UU) o EN 166 (UE).

- *Protección de la piel:*

Manipular con guantes. Los guantes deben ser inspeccionados antes de su uso. Utilice la técnica correcta de quitarse los guantes (sin tocar la superficie exterior del guante) para evitar el contacto de la piel con este producto. Deseche los guantes contaminados después de su uso, de conformidad con las leyes aplicables y buenas



prácticas de laboratorio. Lavar y secar las manos. Los guantes de protección seleccionados deben cumplir con las especificaciones del Reglamento (UE) 2016/425 y de la norma EN 374 derivada del mismo.

- Protección corporal:

Indumentaria impermeable, vestimenta protectora antiestática retardante de la flama. El tipo de equipamiento de protección debe ser elegido según la concentración y la cantidad de sustancia peligrosa al lugar específico de trabajo.

- Protección respiratoria:

Donde el asesoramiento de riesgo muestre que los respiradores purificadores toda la cara con combinación multi-propósito (EE.UU) o tipo AXBEK (EN 1438 ingeniería). Usar respiradores y componentes testados y aprobados bajo los estándares gubernamentales apropiados como NIOSH (EE.UU) o CEN (UE).

- Control de exposición ambiental:

Impedir nuevos escapes o derrames si puede hacerse sin riesgos. No dejar que el producto entre en el alcantarillado.

13. Consideraciones relativas a la eliminación

13.1. Métodos para el tratamiento de residuos

- Producto:

Quemar en un incinerador apto para productos químicos provisto de postquemador y lavador, procediendo con gran cuidado en la ignición ya que este producto es extremadamente inflamable. Ofertar el sobrante y las soluciones no aprovechables a una compañía de vertidos acreditada.

- Envases contaminados:

Eliminar como producto no usado.

Bibliografía Anexos

- [A1] J. Noack, L. Wietschel, N. Roznyatovskaya, K. Pinkwart, J. Tübke, Techno-economic modeling and analysis of redox flow battery systems, *Energies*. 9 (2016). <https://doi.org/10.3390/en9080627>.
- [A2] Website, Perfil 45x45mm Bosch Rexroth, (2019). <https://www.boschrexroth.com/es/es/productos/grupo-de-productos/tecnologia-de-montaje/elementos-basicos-de-mecanica/perfiles-soporte/perfil-soporte-ranura-10-reticulo-45/45x45l#> (accessed November 29, 2019).
- [A3] Website, Finish Thompson DB Series, (2019). <https://www.finishthompson.com/pumps/sealless-pumps/db-series-plastic-mag-drive-pumps/> (accessed December 8, 2019).
- [A4] J.F. Gülich, *Centrifugal Pumps*, Second Edi, Springer, 2010. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [A5] Website, Finish Thompson DB6H, (2019). <https://www.finishthompson.com/pumps/sealless-pumps/db-series-plastic-mag-drive-pumps/db6h/> (accessed December 8, 2019).
- [A6] Website, Depósito 400L para electrolito, (2019). <http://www.novodinamica.com/es/cubetas-colectoras-y-bidones/bidones/deposito-400-l/20/59/483> (accessed October 31, 2019).
- [A7] M. Costigan, R. Cary, S. Dobson, *Vanadium pentoxide and other inorganic vanadium compounds*, (2001).
- [A8] Website, Ácido sulfúrico - Specification data sheet, (2020). https://www.itwreagents.com/download_file/sds/131058/es/sds_131058_es.pdf (accessed January 7, 2020).
- [A9] Website, Ácido fosfórico - Specification data sheet, (2020). https://www.itwreagents.com/download_file/sds/141032/es/sds_141032_es.pdf (accessed January 7, 2020).
- [A10] Website, Cloruro de Vanadio(II) - Specification data sheet, (2020). <https://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=ES&language=es&productNumber=422371&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=https%253A%252F%252Fwww.sigmaaldrich.com%252Fcatalog%252Fsearch%253Fterm%253Dvanadium%252Bchloride%2526interface%253DAI%2526N%253D0%2526mode%253Dmatch%252> (accessed January 7, 2020).
- [A11] Website, Cloruro de Vanadio(III) - Specification data sheet, (2020). <https://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=ES&language=es&productNumber=208272&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=https%253A%252F%252Fwww.sigmaaldrich.com%252Fcatalog%252Fsearch%253Fterm%253Dvanadium%252Bchloride%2526interface%253DAI%2526N%253D0%2526mode%253Dmatch%252> (accessed January 7, 2020).



- [A12] Website, Cloruro de Vanadio(IV) - Specification data sheet, (2020).
<https://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=ES&language=es&productNumber=366617&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=https%253A%252F%252Fwww.sigmaaldrich.com%252Fcatalog%252Fsearch%253Fterm%253Dvanadium%252Bchloride%2526interface%253DAI%2526N%253D0%2526mode%253Dmatch%252> (accessed January 7, 2020).
- [A13] Website, Oxidocloruro de Vanadio(V) - Specification data sheet, (2020).
<https://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=ES&language=es&productNumber=200891&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=https%253A%252F%252Fwww.sigmaaldrich.com%252Fcatalog%252Fsearch%253Fterm%253Dvanadium%252528V%252529%2526interface%253DAI%2526N%253D0%2526mode%253Dmatch%252> (accessed January 7, 2020).
- [A14] Website, Sigma Aldrich, (2020). <https://www.sigmaaldrich.com/spain.html>
(accessed January 7, 2020).
- [A15] Website, PanReac, (2020). <https://www.itwreagents.com/iberia/es/home>
(accessed January 7, 2020).
- [A16] Website, Hidrógeno - Specification data sheet, (2020).
<https://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=ES&language=es&productNumber=295396&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=https%3A%2F%2Fwww.sigmaaldrich.com%2Fcatalog%2Fsearch%3Fterm%3Dhydrogen%26interface%3DAI%26N%3D0%26mode%3Dmatch%2520partialm>
(accessed January 10, 2020).